

## 明 細 書

## 脚式移動ロボットの制御装置

## 技術分野

本発明は、脚式移動ロボットの歩行のみならず、走行にも適した制御  
5 装置に関する。

## 背景技術

脚式移動ロボット、例えば2足移動ロボットの移動動作を行わせるための歩容（目標歩容）の生成は、従来、主にロボットにスムーズな歩行  
10 動作を行なわせる歩容（歩行歩容）を生成することを主目的として行なわれてきた。しかし、近年では、脚式移動ロボットの開発が進むにつれて、該ロボットに歩行だけでなく、走行も行なわせることができる歩容を生成することが望まれている。さらには、十分な摩擦力を発生できない滑りやすい床（いわゆる低ミュー路）上でもロボットを支障なく移動  
15 させることができる歩容を生成することが望まれている。

尚、「歩容」という漢字に「歩」が入っているので歩行に限定されると誤解されやすいが、本来「歩容」とは、トロットなど、馬の走行形態を指す言葉として用いられているように、走行も含んだ概念である。

ここで、歩行と走行の特徴の違いを説明しておく。

20 同時に全脚が空中に存在する瞬間がある移動形態を走行と定義することが一般的ではある。しかし、この定義によって歩行と走行が明確に区別できるとは限らない。たとえば、速いジョギングでは、ほとんどの人間において、同時に全脚が空中に存在する瞬間があるが、遅いジョギングでは、かなりの人間において、常にいずれかの脚が接地している。速い

ジョギングは走行であるのに遅いジョギングは歩行である、と定義するのは、感覚的に少し無理がある。

図 5 1 に、典型的な走行における上体鉛直位置と床反力鉛直成分（左右の脚に作用する床反力鉛直成分の和）のパターンを示し、図 5 2 には、  
5 典型的な歩行における上体鉛直位置と床反力鉛直成分のパターンを示す。

尚、上体鉛直位置速度は、上体代表点の鉛直位置とその速度を意味する。上体水平位置速度は、上体代表点の水平位置とその速度を意味する。上体鉛直位置速度と上体水平位置速度を合わせて、上体位置速度と呼ぶ。

また、「床反力鉛直成分」は、厳密には、床反力の鉛直軸まわりのモーメント成分と区別するために、「並進床反力鉛直成分」と記述すべき  
10 であるが、言葉が長くなるので、ここでは「並進」を省略する。以降、「並進床反力水平成分」も「並進」を省略して「床反力水平成分」と記述する。

まず上体の動きを見てみると、歩行においては、支持脚の上を上体が  
15 通過する瞬間に上体は最も高く、走行においては、この瞬間に最も低い。すなわち、歩行と走行では、上体の上下動パターンの位相が反転している。

一方、床反力に関しては、歩行では比較的一定であるのに対し、走行においては、大きく変動し、支持脚の上を上体が通過する瞬間に床反力は最も大きい。また、当然のことながら、同時に全脚が空中に存在する瞬間において床反力は 0 になっている。より詳しく観察すると、走行では、支持脚を縮めた量にほぼ比例した大きさの床反力が発生する。言い  
20 かえると、走行では、脚をばねのように使って跳ねながら移動していると言える。

25 遅いジョギングでは、典型的な走行と同じ上体上下動の位相を持つ。  
また、遅いジョギングでは、同時に全脚が空中に存在する瞬間がない場

合が多いが、その場合でも、支持脚と遊脚の切り換えが行われる瞬間において、床反力は、完全には0にならないがほぼ0になっている。

したがって、以上のように、上体の上下動や床反力のパターンの上記特徴から歩行と走行を区別した方が、遅いジョギングも走行とみなされ、  
5 感覚とも一致して、より適切と言えよう。

特に、最も特徴的な点で両者を区別するならば、走行とは、支持脚の切り換えが行われる瞬間において、床反力が0またはほぼ0になる移動形態であり、歩行は、それ以外の移動形態（床反力鉛直成分が比較的一定）であると言えよう。

10 ところで、本出願人は先にPCT公開公報WO/02/40224において、脚式移動ロボットの床反力を含む歩容を、動力学的平衡条件（目標歩容の重力と慣性力と床反力との釣り合い条件のことである。狭義では、目標歩容の運動による重力と慣性力との合力が目標ZMPまわりに作用するモーメントの水平成分が0であること。詳細は後述する。）をほぼ満  
15 足しながら、自在かつリアルタイムに生成する技術を先に提案した。この技術や、特開平10-86081号公報、特開平10-277969号公報などにて本出願人が提案してきた一連の脚式移動ロボットの制御装置は、歩行のみならず走行にも適用できるものである。

また、本願出願人は、特開平5-337849号公報等にて、次のよ  
20 うな技術も提案している。すなわち、この技術では、ロボットの傾き偏差（ロボットの上体の鉛直方向に対する実際の傾き角と目標歩容の傾き角との偏差）とが生じたときには、実ZMPをずらして、目標ZMP回りに許容範囲内で姿勢復元方向のモーメントを発生させると共に、目標歩容を生成するために用いるモデル上で、目標ZMP回りにモーメント  
25 を発生させるように目標歩容の運動を決定する。このように、モデル上でモーメントを意図的に発生させることにより、実際のロボット上で姿

勢復元方向のモーメントを発生させることと同等の効果を得ることができる。

しかしながら、これらの技術においては、目標歩容のZMPまわりの床反力モーメント鉛直成分の大きさを考慮していなかった。このため、  
5 この床反力モーメント鉛直成分が過大となって、摩擦の限界を超えて、スピンするおそれがあった。なお、スピンとは、実際のロボットのヨー角（鉛直軸まわり回転角）速度が目標ヨー角速度からずれることを言う。

摩擦係数の高い床面を歩行する場合（この場合、少なくとも1つの脚体は常時接地している）には、床反力鉛直成分が常にほぼロボットの自重相当であるので、摩擦力（すなわち床反力モーメント鉛直成分）の限界が高い。このため、スピンは発生しにくい。  
10

しかるに、走行においては、床反力鉛直成分が0になる、または0に近くなる時があるので、その時には、たとえ摩擦係数が高くとも、床面の摩擦力のモーメント鉛直成分の限界が0になるまたは0に近くなる。  
15 したがって、目標歩容の床反力モーメント鉛直成分が限界を超え、スピンして転倒する恐れがあった。

また、歩行の場合でも、床の摩擦係数が低い場合には、スピンして転倒する恐れがあった。

また、前記の技術では、上体のヨー方向の回転姿勢の目標姿勢からのずれを補償するようにはしていなかったため、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれる恐れがあった。  
20

一方、本出願人は先に、例えばPCT出願PCT/JP02/13596の実施形態において、目標歩容において腕以外が発生するモーメント鉛直成分を打ち消すように、腕を振るようしたもの提案した。

25 この場合には、目標歩容のモーメント鉛直成分はほぼ0になるが、脚を激しく振って移動する場合には、腕の振りも激しくなる。



一般的に、人間型ロボットにおいては、腕の質量は、脚の質量に較べて小さい。したがって、モーメント鉛直成分を完全に打ち消すためには、腕は、脚の振りよりも激しく振る必要がある。

しかし、腕の動作範囲には限界があり、また、腕のアクチュエータのトルクおよび速度にも限界があるので、脚を激しく振って移動する場合  
5 には、腕によってモーメント鉛直成分を完全に打ち消すことができなくなる場合があった。

また、目標歩容において腕以外が発生するモーメント鉛直成分を完全に打ち消すように、腕を振るようにすると、腕振りの中心が徐々にオフ  
10 セットしていき、左右の腕の振りが非対称になる恐れがあった。具体的には、ロボットが左旋回する場合に、腕以外が発生するモーメント鉛直成分を完全に打ち消すように、腕を振るようにすると、脚と胴体が左を向いたことによる角運動量変化を打ち消すために、左腕は前側には大きく、後ろ側には小さく振られ、右の腕は前側には小さく後ろ側には大きく  
15 振られるようになる。したがって、この場合には、左腕は、前側の振り動作限界に達する恐れが生じ、右腕は、後ろ側の振り動作限界に達する恐れが生じる。

また、さらに左右の腕の振りが非対称にならないように、腕振りの中心を戻そうとすると、この動作によって、床反力モーメント鉛直成分が  
20 発生し、目標歩容の床反力モーメント鉛直成分が限界を超え、スピンする恐れがあった。

したがって、本発明の目的は、上記の問題点を解消し、歩行、走行等の歩容形態や床面の摩擦状態によらずに、より一層好適な歩容を生成することができる制御装置を提供することにある。

より具体的には、本発明は、ロボットと床面との間の摩擦力のモーメント鉛直成分の限界を考慮し、ロボットのヨー方向の姿勢状態を安定に  
25

保ちつつ、スピンおよびそれに起因するロボットの転倒を防止することが可能な歩容でロボットを動作させることができる制御装置を提供することを目的とする。そして、空中時、あるいは摩擦力のモーメント鉛直成分の限界が極めて低い時にでも、動力学平衡条件を満足する歩容の運動パターンでロボットを動作させることができる制御装置を提供することを目的とする。さらに、目標歩容の左右非対称性が大きくなることを防止して、動作の継続性を確保することを目的とする。

#### 発明の開示

10 本発明の脚式移動ロボットの歩容生成装置の第1発明は、

上体から延設された脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標運動および目標床反力の瞬時値を、少なくとも該ロボットの運動と床反力との関係を表す動力学モデルを用いて逐次決定しつつ、その決定した目標運動および目標床反力の瞬時値に追従させるように前記ロボットの動作制御を行なう脚式移動ロボットの制御装置において、

前記目標運動および目標床反力に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

20 少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状態量との偏差と前記許容範囲とに基づいて、前記目標床反力に対応する制限対象量を前記許容範囲に収めつつ、前記目標運動に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記目標床反力の床反力モーメントとの差が前記偏差を0に近づけるように前記目標運動および目標床反力の瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とする。

かかる第1発明によれば、少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状態量との偏差と前記許容範囲とに基づいて、前記目標床反力に対応する制限対象量を前記許容範囲に収めつつ、前記目標運動に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記目標床反力の床反力モーメントとの差が前記偏差を0に近づけるように前記目標運動および目標床反力の瞬時値を決定する。このため、鉛直軸回りまたは床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する状態量（以下、ヨー方向の姿勢状態量という）を、目標状態量、すなわち目標運動におけるヨー方向の目標姿勢状態量に近づけるようにしつつ（前記偏差を0に近づけるようにしつつ）、実際のロボットに作用する床反力モーメント鉛直成分等の制限対象量を許容範囲内に収めることができる。つまり、摩擦力モーメント鉛直成分の限界と前記偏差とを考慮して、目標運動および目標床反力の瞬時値が決定される。それにより、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損なわれるのを防止できる。また、制限対象量が許容範囲に収まる限り、該制限対象量を常に0もしくはほぼ0にする必要がないことから、ロボットのある部位の運動が過剰に激しい運動となったりするのを防止できる。

かかる第1発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記偏差に応じて該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する手段と、少なくとも前記目標運動の所定の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて前記制限対象量が前記許容範囲を超えないように該所定の仮瞬時値の修正量を決定する手段とを備え、その決定した修

正量に応じて前記仮瞬時値を修正することにより前記目標運動の瞬時値を決定することが好ましい（第2発明）。

かかる第2発明によれば、目標運動の所定の仮瞬時値によって前記動力学モデル上で発生する（目標運動に釣り合う）床反力モーメントと、  
5 前記偏差を0に近づけるための補償床反力モーメントとに応じて前記所定の仮瞬時値の修正量を決定するので、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標状態量に近づけつつ、前記制限対象量が許容範囲に収まるような適切な目標運動の瞬時値を決定できる。

この第2発明では、前記動力学モデルの状態量を所定の状態量に近づけるための付加的な床反力モーメントであるモデル補正床反力モーメントを決定する手段を備え、前記目標運動の所定の仮瞬時値の修正量を決定する手段は、少なくとも前記所定の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントと前記モデル補正床反力モーメントとに応じて前記制限対象量が前記許容範囲を超えないように前記目標運動の仮瞬時値の修正量を決定することが好ましい（第3発明）。

この第3発明によれば、目標運動の所定の仮瞬時値の修正量を決定するとき、目標運動の所定の仮瞬時値に動力学モデル上で釣り合う床反力モーメント、及び前記補償床反力モーメントだけでなく、動力学モデルの状態量に係るモデル補正床反力モーメントを考慮するので、第2発明の  
20 効果に加えて、動力学モデルが発散しないようにすることができる。

また、上記第2及び第3発明では、前記所定の仮瞬時値の修正量は、前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動の修正量であることが好適である（第4発明）。

25 これにより制限対象量を許容範囲に収めるように目標運動の仮瞬時値を修正できる。

この第4発明では、前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動は、該ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の運動であることが好適である（第5発明）。

これによれば、目標運動の仮瞬時値の修正処理が容易になる。

- 5     なお、ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動は、ロボットの全体重心を一定に維持するような運動であることが特に好ましい。

また、本発明の脚式移動ロボットの制御装置の第6発明は、

- 10    上体から延設された脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標運動の瞬時値を、少なくとも該ロボットの運動と床反力との関係を表す動力学モデルを用いて逐次決定しつつ、その決定した目標運動の瞬時値に追従させるように前記ロボットの動作制御を行なう脚式移動ロボットの制御装置において、

- 15    前記目標運動に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

- 20    少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状態量との偏差に応じて該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する補償床反力モーメント決定手段と、

- 25    前記目標運動に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて定まる前記制限対象量が前記許容範囲に収まるように目標運動の瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とする。

かかる第6発明によれば、前記目標運動に前記動力学モデル上で釣り

合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて定まる前記制限対象量（例えば前記目標運動に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとの和）が前記許容範囲に収まるように目標運動の瞬時値を決定する。このため、ロボットのヨー

5 方向の姿勢状態量を目標状態量（目標運動におけるヨー方向の姿勢状態量）に近づけるための補償床反力モーメントを付加的に発生させるようにしても、実際のロボットに作用する床反力モーメント鉛直成分等の制限対象量を許容範囲内に収めることができるような目標運動を生成できる。つまり、摩擦力モーメント鉛直成分の限界と前記偏差を考慮して、

10 目標運動の瞬時値が決定される。それにより、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することを可能とするロボットの目標運動を決定することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損な

15 われるの防止することを可能とする目標運動を決定することができる。また、制限対象量が許容範囲に収まる限り、該制限対象量を常に0もしくはほぼ0にする必要がないことから、ロボットのある部位の運動が過剰に激しい運動となったりするのを防止できる。

この第6発明では、前記許容範囲に収めた前記制限対象量を目標床反

20 力モーメントとし、その目標床反力モーメントに追従させるようにロボットの動作制御を行なう手段を備えることが好ましい（第7発明）。

これによれば、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道から

25 らずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損なわれるのを防止できる。

上記第 6 及び第 7 発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて定まる前記制限対象量を前記許容範囲に収めるために、前記ロボットの運動のうち、前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動を調整して前記目標運動の瞬時値を決定することが好ましい（第 8 発明）。

これにより制限対象量を許容範囲に収めるように目標運動の瞬時値を決定できる。

この第 8 発明では、前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動は、該ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の運動であることが好適である（第 9 発明）。

これによれば、目標運動の瞬時値の決定処理が容易になる。

なお、ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動は、ロボットの全体重心を一定に維持するような運動であることが特に好ましい。

また、本発明の脚式移動ロボットの制御装置の第 10 発明は、

上体から延設された脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標運動の瞬時値を、少なくとも該ロボットの運動と床反力との関係を表す動力学モデルを用いて逐次決定しつつ、その決定した目標運動の瞬時値に追従させるように前記ロボットの動作制御を行なう脚式移動ロボットの制御装置において、

前記目標運動に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

前記目標運動の仮瞬時値を逐次決定する仮瞬時値決定手段と、

少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状態量との偏差に応じて該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する補償床反力モーメント決定手段と、

- 5 前記目標運動の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて定まる前記制限対象量のうちの前記許容範囲を逸脱した分をモーメント修正操作量とし、そのモーメント修正操作量に応じて当該逸脱分が減少傾向になるように前記目標運動の仮瞬時値を修正することにより前記目標運動の瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とする。
- 10

- この第10発明によれば、前記目標運動の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて定まる前記制限対象量（例えば前記目標運動の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとの
- 15 和）のうちの前記許容範囲を逸脱した分をモーメント修正操作量とし、そのモーメント修正操作量に応じて当該逸脱分が減少傾向になるように前記目標運動の仮瞬時値を修正することにより前記目標運動の瞬時値を決定する。このため、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標状態量（目標運動におけるヨー方向の姿勢状態量）に近づけるための補償床反
- 20 力モーメントを付加的に発生させるようにしても、実際のロボットに作用する床反力モーメント鉛直成分等の制限対象量をほぼ許容範囲内に収めることができるような目標運動を生成できる。つまり、摩擦力モーメント鉛直成分の限界と前記偏差とを考慮して、目標運動の瞬時値が決定される。それにより、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することを可能とするロボットの目標運動を決定することがで
- 25



きる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損なわれるの防止することを可能とする目標運動を決定することができる。また、制限対象量が許容範囲に収まる限り、該制限対象量を常に0もしくはほぼ0にする必要がないことから、ロボットのある部位の運動が過剰に激しい運動となったりするのを防止できる。

かかる第10発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記モーメント修正操作量をローパスフィルタに通したものに依じて前記目標運動の仮瞬時値の修正量を求め、その求めた修正量により該仮瞬時値を修正することにより前記目標運動の瞬時値を決定することが好ましい（第11発明）。

この第11発明によれば、目標運動の仮瞬時値が過剰に修正されるのを防止することができる。

上記第10および第11発明では、前記目標運動の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに依じて定まる前記制限対象量を前記許容範囲により制限してなる制限済制限対象量に対応する床反力モーメントを目標床反力モーメントとし、その目標床反力モーメントに追従させるようにロボットの動作制御を行なう手段を備えることが好ましい（第12発明）。

この第12発明によれば、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損なわれるのを防止できる。

上記第10～第12発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運

動を前記目標運動の仮瞬時値から修正することにより前記目標運動の瞬時値を決定することが好ましい（第13発明）。

これにより制限対象量を許容範囲に収めるように目標運動の瞬時値を決定できる。

- 5     この第13発明では、前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動は、該ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の運動であることが好適である（第14発明）。

これによれば、目標運動の仮瞬時値の修正処理が容易になる。

- 10     なお、前記第1～第14発明では、前記ロボットの姿勢に関する状態量は、具体的には、該ロボットの上体のヨー角（ヨー方向の回転角）又はヨー角速度（ヨー方向の回転角の角速度）を含むことが好ましい（第15発明）。この第15発明によれば、ロボットの上体のヨー方向の姿勢の安定性を高めることができる。なお、このことは、後述する第15  
15     ～第51発明においても同様である。

また、前記第1～第15発明では、前記ロボットの滑りの発生を判断する滑り判断手段を備え、前記許容範囲設定手段は、該滑り判断手段の判断結果に応じて前記許容範囲を可變的に設定することが好ましい（第16発明）。

- 20     この第16発明によれば、前記ロボット（目標運動の瞬時値に、あるいは目標運動および目標床反力の瞬時値に追従して動作しているロボット）の滑りの発生の判断結果に応じて制限対象量の許容範囲を可變的に設定するので、ロボットの滑りの発生を確実に抑制できる。なお、滑りの発生が有ると判断されたときには、許容範囲は、それを狭めるように  
25     設定されるべきである。

この第16発明では、例えば、次のようにして、滑りの発生を判断す

ることができる。

すなわち、前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体の先端部の対地速度に基づき滑りの発生を判断する（第17発明）。この場合、例えば該対地速度の絶対値が所定値よりも大きいときには、滑りの発生  
5 が有ると判断することができる。

あるいは、前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体に作用する実床反力の時間的変化率と該脚体の先端部の対地速度とに基づき、該脚体の見かけばね定数を求める手段を備え、少なくとも該見かけばね定数に基づき滑りの発生を判断する（第18発明）。この場合、例えば  
10 該見かけばね定数が所定値よりも小さいときには、滑りの発生が有ると判断することができる。

あるいは、前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体に作用する実床反力を、所定周波数の近傍範囲に周波数通過特性を有するバンドパスフィルタに通したものに基づき滑りの発生を判断する（第19発  
15 明）。この場合、前記実床反力をバンドパスフィルタに通したものは、いわゆる滑り振動が発生しているときの、実床反力の振動成分に相当するものとなる。そして、例えばこの振動成分の大きさ（絶対値）が所定値よりも大きいときには、滑り振動の発生が有ると判断することができる。

20 なお、滑りの発生の判断は、第17～第19発明のいずれでも行なうことができるが、これらの第17～第19発明の2つ以上を組み合わせる滑りの発生の判断を行なうようにしてもよい。

また、本発明の脚式移動ロボットの制御装置の第20発明は、

上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボッ  
25 トの目標歩容を生成し、その目標歩容に追従させるように該ロボットの動作を制御する制御装置において、

少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状状態との偏差に応じて、該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する手段と、

- 5 前記目標歩容に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

- 10 前記目標歩容を構成する目標運動の仮瞬時値を決定する仮瞬時値決定手段と、

- 前記ロボットの運動と該運動に釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分との関係を表す動力学モデルに、少なくとも前記目標運動の仮瞬時値を入力して、該動力学モデルの出力としての床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分を求め、前記求めた鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから所定の演算によって前記制限対象量の仮瞬時値であるモデル制限対象量瞬時値を決定するモデル演算手段と、
- 15

- 少なくとも該モデル制限対象量瞬時値を前記許容範囲に収めるように前記目標運動の仮瞬時値を補正して目標運動の瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とする。
- 20

- この第20発明によれば、少なくとも前記目標運動の仮瞬時値を前記動力学モデルに入力することで、該動力学モデルの出力としての床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分が求められる。そして、その求めた鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから所定の演算（例えば足し算）によって前記制限対象量の仮瞬時値であるモデル制限対象量瞬時値（これは前記動力学モデル上で目標運動が
- 25

発生する床反力モーメントに補償床反力モーメントを付加した場合の制限対象量の瞬時値に相当する）が決定され、少なくとも該モデル制限対象量瞬時値を前記許容範囲に収めるように前記目標運動の仮瞬時値を補正して目標運動の瞬時値を決定する。

- 5       このため、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標状態量（目標運動におけるヨー方向の姿勢状態量）に近づけるための補償床反力モーメントを付加的に発生させるようにしても、実際のロボットに作用する床反力モーメント鉛直成分等の制限対象量を許容範囲内に収めることができるような目標運動を生成できる。つまり、摩擦力モーメント鉛直成分の
- 10   限界と前記偏差を考慮して、目標運動の瞬時値が決定される。それにより、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することを可能とするロボットの目標運動を決定することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の
- 15   姿勢の継続的な安定性が損なわれるのを防止することを可能とする目標運動を決定することができる。また、制限対象量が許容範囲に収まる限り、該制限対象量を常に0もしくはほぼ0にする必要がないことから、ロボットのある部位の運動が過剰に激しい運動となったりするのを防止できる。
- 20   なお、前記動力学モデルは、基本的には近似精度の高いものを用いることが好適である。

- この第20発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の瞬時値に前記動力学モデル上で略釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから前記所定の演
- 25   算によって決定される制限対象量瞬時値に対応する床反力モーメント瞬時値を、前記目標歩容を構成する目標床反力の床反力モーメント瞬時値

として決定することが好ましい（第21発明）。

これによれば、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損なわれるのを防止できる。

上記第20および第21発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記ロボットの摂動運動と床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分の摂動分との関係を表す摂動モデルと、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記許容範囲とに基づき前記摂動モデルの摂動分を操作する摂動モデル操作量を決定する手段と、その決定した摂動モデル操作量を前記摂動モデルに入力することにより前記目標運動の補正量を求める手段と、該補正量により前記目標運動の仮瞬時値を補正することにより前記目標運動の瞬時値を決定する手段とを備えることが好ましい（第22発明）。

すなわち、前記摂動モデルは線形性が高いので、前記制限対象量を許容範囲に収める上での適正な目標運動の補正量の算出処理が容易になると共に、その補正量による前記目標運動の仮瞬時値の補正処理が容易になる。

この第22発明では、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記摂動モデル操作量を0と仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値に基づき決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記摂動モデル操作量を決定することが好ましい（第23

発明)。

この第23発明によれば、まず、摂動モデル操作量を0と仮定した場合の制限対象量の推定値を求め、この推定値と許容範囲との比較に基づき制限済制限対象量を決定する。なお、この場合、例えばモデル制限対象量瞬時値をそのまま制限対象量の推定値としてもよいが、ジャイロ効果を考慮して、制限対象量の推定値を決定するようにしてもよい。また、制限済制限対象量は、前記許容範囲内でできるだけ制限対象量の推定値に近い値に決定することが好ましい。そして、少なくとも前記モデル制限対象量瞬時値と制限済制限対象量との差に基づき、摂動モデル操作量を決定する。これにより、補償床反力モーメントを付加的に発生させても、制限対象量が許容範囲を超えることが無いようにすることを可能とする摂動モデル操作量を適切に決定できる。

また、前記第22発明では、少なくとも前記摂動モデルの状態量に応じて前記摂動モデル操作量の要求値を決定する手段を備え、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値、前記許容範囲、及び前記要求値に基づき前記摂動モデルに入力する摂動モデル操作量を決定することが好ましい(第24発明)。

これによれば、前記許容範囲と、補償床反力モーメントを加味したモデル制限対象量瞬時値だけでなく、摂動モデルの状態量(摂動モデルの要素となる回転体の回転角やその角速度など)の要求値を考慮して、前記摂動モデル操作量が決定される。これにより、該摂動モデルの状態量が前記要求値に対応する状態量からかけ離れないようにして、不適正な目標運動の補正量が求められるような事態を防止することができる。

この第24発明では、前記摂動モデル操作量の要求値を決定する手段は、前記摂動モデルの状態量と該状態量に対する目標値との偏差に応じたフィードバック制御則により前記要求値を逐次決定することが好適で

ある（第25発明）。

この第25発明によれば、摂動モデルの状態量がある目標状態量の近傍に概ね維持されるように摂動モデル操作量が決定される。これにより、この摂動モデルによって決定される目標運動の補正量を、摂動モデルの  
5 状態を安定に保ちつつ、制限対象量を許容範囲に収める上で好適なものにすることができる。

さらに、上記第24発明および第25発明では、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記摂動モデル操作量を前記要求値に一致させたと仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記要求値とに基づき決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記摂動モデル操作量を決定することが好ましい（第26発明）。  
10

これによれば、まず、摂動モデル操作量を前記要求値に一致させたと仮定した場合、すなわち、該要求値のみを摂動モデルに入力したとした場合の制限対象量の推定値を求め、この推定値と許容範囲との比較に基づき決定した制限済制限対象量を決定する。なお、この場合、例えばモデル制限対象量瞬時値と上記要求値との和をそのまま制限対象量の推定値としてもよいが、ジャイロ効果を考慮して、制限対象量の推定値を決定するようにしてもよい。また、制限済制限対象量は、前記許容範囲内でできるだけ制限対象量の推定値に近い値に決定することが好ましい。そして、少なくとも前記モデル制限対象量瞬時値と制限済制限対象量との差に基づき、摂動モデル操作量を決定する。これにより、補償床反力  
20 モーメントを付加的に発生させても、制限対象量が許容範囲を超えることが無く、且つ摂動モデルの安定性も確保し得る摂動モデル操作量を適



切に決定できる。

前記第22発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の補正量を前記動力学モデルに追加的に入力する手段を備えるようにしてもよい（第27発明）。

- 5      これによれば、目標運動の補正量を前記動力学モデルに追加的に入力するので、該動力学モデルから目標運動に瞬時値に釣り合う床反力モーメントの鉛直成分または床面法線方向成分を直接的に求めることができる。

- 10      摂動モデルを備える前記22～第27発明にあつては、前記摂動モデルは、ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を摂動させる摂動運動と前記制限対象量摂動分との関係を表すモデルであることが好ましい（第28発明）。

これによれば、前記制限対象量を許容範囲に収めるための目標運動の補正量を適正に決定できる。

- 15      この第28発明では、前記摂動運動は、該ロボットの重心位置を略一定に維持する摂動運動であることが好適である（第29発明）。

これによれば、摂動モデルによる目標運動の補正を、ロボットの並進床反力に影響を及ぼすことなく行なうことができる。

- 20      さらに上記第28および第29発明では、前記摂動運動は、ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の摂動運動であることが好ましい（第30発明）。

これによれば、目標運動の補正量の算出処理が容易になる。

また、本発明の脚式移動ロボットの制御装置の第31発明は、

- 25      上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成し、その目標歩容に追従させるように該ロボットの動作を制御する制御装置において、

少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状状態との偏差に応じて、該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する手段と、

- 5 前記目標歩容に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

- 前記目標歩容を構成する目標運動及び目標床反力のうちの少なくとも  
10 目標床反力の仮瞬時値を逐次決定する目標床反力仮瞬時値決定手段と、

少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値を前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第1動力学モデルに入力し、該第1動力学モデルの出力としての目標運動の仮瞬時値を逐次求める第1モデル演算手段と、

- 前記ロボットの運動と該運動に釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分との関係を表す第2動力学モデルに、少なくと  
15 も前記目標運動の仮瞬時値を入力して、該第2動力学モデルの出力としての床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分を求め、前記求めた鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから所定の演算によって前記制限対象量の仮瞬時値であるモデル制限対象量  
20 瞬時値を決定する第2モデル演算手段と、

少なくとも該モデル制限対象量瞬時値を前記許容範囲に収めるように目標床反力の床反力モーメント補正量を求め、その求めた床反力モーメント補正量を前記第1動力学モデルに追加的に入力する第1モデル入力補正手段とを備え、

- 25 少なくとも前記第2動力学モデルの入力に基づいて前記目標運動の瞬時値を決定することを特徴とする。

## 23

かかる第31発明によれば、少なくとも前記目標運動の仮瞬時値を前記第2動力学モデルに入力することで、該第2動力学モデルの出力としての床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分が求められ、これと、前記補償床反力モーメントとから所定の演算（例えば足し算）によって前記制限対象量の仮瞬時値であるモデル制限対象量瞬時値（これは前記動力学モデル上で目標運動が発生する床反力モーメントに補償床反力モーメントを付加した場合の制限対象量の瞬時値に相当する）が決定される。そして、少なくとも該モデル制限対象量瞬時値を前記許容範囲に収めるように目標床反力の床反力モーメント補正量を求め、その求めた床反力モーメント補正量を前記第1動力学モデルに追加的に入力するので、少なくとも第2動力学モデルの入力に基づいて、前記制限対象量を許容範囲に収め得るような目標運動の瞬時値が得られることとなる。

このため、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標状態量（目標運動におけるヨー方向の姿勢状態量）に近づけるための補償床反力モーメントを付加的に発生させるようにしても、実際のロボットに作用する床反力モーメント鉛直成分等の制限対象量を許容範囲内に収めることができるような目標運動を生成できる。つまり、摩擦力モーメント鉛直成分の限界と前記偏差を考慮して、目標運動の瞬時値が決定される。それにより、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することを可能とするロボットの目標運動を決定することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損なわれるの防止することを可能とする目標運動を決定することができる。また、制限対象量が許容範囲に収まる限り、該制限対象量を常に0もしくはほぼ0にする必要がないことから、ロボットのある部位の運動が過剰に激しい運動となったりするのを防止でき

る。

なお、前記第2動力学モデルは、基本的には第1動力学モデルよりも近似精度の高いものを用いることが好適である。

かかる第31発明では、前記目標運動の瞬時値に前記第2動力学モデル上で略釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから前記所定の演算によって決定される制限対象量瞬時値に対応する床反力モーメント瞬時値を、前記目標歩容を構成する目標床反力の床反力モーメント瞬時値として決定する手段を備えることを好ましい（第32発明）

これによれば、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損なわれるのを防止できる。

上記第31発明および第32発明では、例えば前記第1モデル入力補正手段は、少なくとも前記目標床反力の床反力モーメント補正量を0と仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値に基づいて決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記床反力モーメント補正量を決定することが好ましい（第33発明）。

この第33発明によれば、まず、少なくとも前記目標床反力の床反力モーメント補正量を0と仮定した場合の制限対象量の推定値を求め、この推定値と許容範囲との比較に基づき制限済制限対象量を決定する。なお、この場合、例えばモデル制限対象量瞬時値をそのまま制限対象量の

推定値としてもよいが、ジャイロ効果を考慮して、制限対象量の推定値を決定するようにしてもよい。また、制限済制限対象量は、前記許容範囲内でできるだけ制限対象量の推定値に近い値に決定することが好ましい。そして、少なくとも前記モデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき、床反力モーメント補正量を決定する。補償床反力モーメントを付加的に発生させても、制限対象量が許容範囲を超えることが無いようにすることを可能とする適切な床反力モーメント補正量を決定できる。

また、上記第31発明および第32発明では、より好ましくは、前記目標床反力の床反力モーメント補正量の要求値を決定する手段を備え、前記第1モデル入力補正手段は、少なくとも前記目標床反力の床反力モーメント補正量を前記要求値に一致させたと仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記要求値とに基づいて決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記床反力モーメント補正量を決定する（第34発明）。

この第34発明によれば、まず、目標床反力の床反力モーメント補正量を前記要求値に一致させたと仮定した場合、すなわち、第1動力モデルに該要求値のみを追加入力したと仮定した場合の制限対象量の推定値を求め、この推定値と許容範囲との比較に基づき決定した制限済制限対象量を決定する。なお、この場合、例えばモデル制限対象量瞬時値と上記要求値との和をそのまま制限対象量の推定値としてもよいが、ジャイロ効果を考慮して、制限対象量の推定値を決定するようにしてもよい。また、制限済制限対象量は、前記許容範囲内でできるだけ制限対象量の

推定値に近い値に決定することが好ましい。そして、少なくとも前記モデル制限対象量瞬時値と制限済制限対象量との差に基づき、床反力モーメント補正量を決定する。これにより、補償床反力モーメントを付加的に発生させても、制限対象量が許容範囲を超えることが無く、且つ、前記要求値にできるだけ近づくような適切な床反力モーメント補正量を決定できる。

また、上記第31～第34発明では、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記許容範囲とに基づき前記目標運動の補正量を求め、その求めた補正量を前記第2動力学モデルに追加的に入力する第2モデル入力補正手段を備えるようにしてもよい（第35発明）。

これによれば、第1動力学モデルの安定性を高めつつ、制限対象量を許容範囲により適切に収めるための目標運動の瞬時値を第2動力学モデルに入力させるようにすることができる。

この第35発明では、前記ロボットの振動運動と制限対象量振動分との関係を表す振動モデルと、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記許容範囲とに基づき床反力モーメントの操作量を決定する手段と、その決定した床反力モーメントの操作量を、前記第1動力学モデルに入力する前記目標床反力の床反力モーメント補正量と前記振動モデルに入力する振動モデル操作量とに分配する分配手段とを備え、前記第2モデル入力補正手段は、前記振動モデル操作量を前記振動モデルに入力することにより前記目標運動の補正量を求めることが好ましい（第36発明）。

これによれば、前記床反力モーメントの操作量を第1動力学モデルの入力する床反力モーメント補正量と振動モデルに入力する振動モデル操作量とに分配するので、第1動力学モデルと振動モデルとのそれぞれの特性に適した入力をそれぞれのモデルに入力することができる。そのた

め、第1動力学モデルや摂動モデルが不安定になるのを防止しつつ、制限対象量を許容範囲に収め得る目標運動の瞬時値を適切に決定できる。また、摂動モデルを用いることで、第2動力学モデルに追加的に入力する目標運動の補正量の算出処理が容易になる。

- 5      なお、第1動力学モデルに入力する床反力モーメント補正量は床反力モーメントの操作量のうちの低周波成分（直流成分）であることが望ましく、摂動モデルに入力する摂動モデル操作量は、床反力モーメントの操作量のうちの高周波成分であることが望ましい。

- 10      この第36発明では、少なくとも前記摂動モデルの状態量に応じて前記床反力モーメントの操作量の要求値を決定する手段を備え、前記床反力モーメントの操作量を決定する手段は、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記許容範囲と前記要求値とに基づき前記分配手段に与える床反力モーメントの操作量を決定することが好ましい（第37発明）。

- 15      この第37発明によれば、前記補償床反力モーメントを加味したモデル制限対象量瞬時値と許容範囲だけでなく、摂動モデルの状態量（摂動モデルの要素としての回転体の回転角やその角速度など）を考慮して、分配手段に入力する床反力モーメントの操作量が決定されるので、摂動モデルの状態量が前記要求値に対応する状態量からかけ離れないように  
20      して、該摂動モデルによって求められる目標運動の補正量が不適切なものとなるのを防止できる。

- 25      この第37発明では、前記床反力モーメントの操作量の要求値を決定する手段は、前記摂動モデルの状態量と該状態量に対する目標値との偏差に応じたフィードバック制御則により前記要求値を逐次決定することが好適である（第38発明）。

この第38発明によれば、摂動モデルの状態量がある目標状態量の近

傍に概ね維持されるように床反力モーメントの操作量、ひいては摂動モデル操作量が決定される。これにより、この摂動モデルによって決定される目標運動の補正量を、摂動モデルの状態を安定に保ちつつ、制限対象量を許容範囲に収める上で好適なものにすることができる。

- 5      また、上記の如く摂動モデルを備える第36～38発明では、前記摂動モデルは、ロボットの角運動量変化率の鉛直軸回り又は床面法線軸回りの成分を摂動させる摂動運動と前記制限対象量摂動分との関係を表すモデルであることが好ましい（第39発明）。

- 10      これによれば、前記制限対象量を許容範囲に収めるための目標運動の補正量を適正に決定できる。

この第39発明では、前記摂動運動は、ロボットの重心位置を略一定に維持する摂動運動であることが好適である（第40発明）。

これによれば、摂動モデルによる目標運動の補正を、ロボットの並進床反力に影響を及ぼすことなく行なうことができる。

- 15      さらに、上記第39および第40発明では、前記摂動運動は、ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の摂動運動であることが好ましい（第41発明）。

これによれば、目標運動の補正量の算出処理が容易になる。

- 20      また、前記第36～第41発明では、例えば前記床反力モーメントの操作量を決定する手段は、前記摂動モデル操作量を0と仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値に基づいて決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記床反力モーメントの操  
25      作量を決定する（第42発明）。



この第42発明によれば、まず、摂動モデル操作量を0と仮定した場合の制限対象量の推定値を求め、この推定値と許容範囲との比較に基づき制限済制限対象量を決定する。なお、この場合、例えばモデル制限対象量瞬時値をそのまま制限対象量の推定値としてもよいが、ジャイロ効果  
5 果を考慮して、制限対象量の推定値を決定するようにしてもよい。また、制限済制限対象量は、前記許容範囲内でできるだけ制限対象量の推定値に近い値に決定することが好ましい。そして、少なくとも前記モデル制限対象量瞬時値と制限済制限対象量との差に基づき、床反力モーメントの操作量を決定する。これにより、補償床反力モーメントを付加的に発生  
10 させても、制限対象量が許容範囲を超えることが無いようにすることを可能とする床反力モーメントの操作量を決定できる。

また、特に前記第37～第41発明において、摂動モデル操作量の要求値を決定する場合には、前記床反力モーメントの操作量を決定する手段は、前記摂動モデル操作量を前記要求値に一致させたと仮定した場合  
15 の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記要求値とに基づいて決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記床反  
20 力モーメントの操作量を決定することが好ましい（第43発明）。

これによれば、まず、摂動モデル操作量を前記要求値に一致させたと仮定した場合、すなわち、該要求値のみを摂動モデルに入力したとした場合の制限対象量の推定値を求め、この推定値と許容範囲との比較に基づき決定した制限済制限対象量を決定する。なお、この場合、例えばモ  
25 デル制限対象量瞬時値と上記要求値との和をそのまま制限対象量の推定値としてもよいが、ジャイロ効果を考慮して、制限対象量の推定値を決

定するようにしてもよい。また、制限済制限対象量は、前記許容範囲内でできるだけ制限対象量の推定値に近い値に決定することが好ましい。そして、少なくとも前記モデル制限対象量瞬時値と制限済制限対象量との差、すなわち、モデル制限対象量瞬時値のうちの許容範囲を逸脱する  
5 分に基づき、床反力モーメントの操作量を決定する。これにより、補償床反力モーメントを付加的に発生させても、制限対象量が許容範囲を超えることが無く、且つ摂動モデルの安定性も確保し得る床反力モーメントの操作量を適切に決定できる。

また、本発明の脚式移動ロボットの制御装置の第44発明は、

10 上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成し、その目標歩容に追従させるように該ロボットの動作を制御する制御装置において、

少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状態量との偏差に応じて、該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを  
15 決定する手段と、

前記目標歩容に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手  
20 段と、

前記目標歩容を構成する目標運動及び目標床反力のうちの少なくとも目標床反力の仮瞬時値を逐次決定する目標床反力仮瞬時値決定手段と、

少なくとも該目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第1動力学モデルに入力し、該第1動力学モデルの出力  
25 としての目標運動の第1仮瞬時値を求める第1モデル演算手段と、

目標運動の第2仮瞬時値を決定する手段であって、その決定する第2

仮瞬時値にロボットの運動と床反力との関係を表す第2動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから所定の演算により求まる制限対象量瞬時値が前記許容範囲に収まるように、少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値に基づき、該目標運動の第2仮瞬時値を決定する制限付き第2モデル演算手段と、

少なくとも前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差に基づいて、該差が0に近づくように床反力モーメントの操作量を求める操作量算出手段と、

10 該床反力モーメントの操作量を前記第1動力学モデル及び第2動力学モデルのうちの少なくともいずれか一方に追加的に入力するモデル入力補正手段とを備え、

前記目標運動の第2仮瞬時値を該目標運動の目標瞬時値として決定することを特徴とする。

15 この第44発明によれば、目標床反力の仮瞬時値が第1動力学モデルに入力されて、目標運動の第1仮瞬時値が求められる一方、目標床反力の仮瞬時値が第2動力学モデルにも入力され、この第2動力学モデルを用いて目標運動の第2仮瞬時値が求められる。但し、この場合、目標運動の第2仮瞬時値に第2動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから所定の演算により求まる制限対象量瞬時値が前記許容範囲に収まるように該目標運動の第2仮瞬時値が決定される。そして、少なくとも前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差に基づいて、該差が零に近づくように床反力モーメントの操作量が求められ、これが第1動力学モデル及び第2動力学モデルのうちの少なくともいずれか一方に追加的に入力  
20 される。さらに、目標運動の第2仮瞬時値が該目標運動の目標瞬時値と

して決定される。

このため、制限付き第2モデル演算手段が求める目標運動の第2仮瞬時値は、前記制限対象量を許容範囲に収めつつ、安定性の高いものとなる。その結果、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標状態量（目標運動におけるヨー方向の姿勢状態量）に近づけるための補償床反力モーメントを付加的に発生させるようにしても、実際のロボットに作用する床反力モーメント鉛直成分等の制限対象量を許容範囲内に収めることができるような目標運動を生成できる。つまり、摩擦力モーメント鉛直成分の限界と前記偏差を考慮して、目標運動の瞬時値が決定される。それにより、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することを可能とするロボットの目標運動を決定することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損なわれるの防止することを可能とする目標運動を決定することができる。また、制限対象量が許容範囲に収まる限り、該制限対象量を常に0もしくはほぼ0にする必要がないことから、ロボットのある部位の運動が過剰に激しい運動となったりするのを防止できる。

なお、第1動力学モデルは比較的動力学的な近似精度の低いものでよく、また、第2動力学モデルは、第1動力学モデルよりも動力学的な近似精度が高いものであることが望ましい。

かかる第4発明では、前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差は、前記ロボットの所定の部位の姿勢の、鉛直軸回り又は床面法線軸回りの状態量の差を含むことが好ましい（第5発明）。

これによれば、前記所定の部位（例えば上体）のヨー方向の姿勢状態量の安定性を好適に高めることができる。

## 3 3

また、上記第 4 4 および第 4 5 発明では、前記目標運動の瞬時値に前記第 2 動力学モデル上で略釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから前記所定の演算によって決定される制限対象量瞬時値に対応する床反力モーメント瞬時値を、前記目標歩容を構成する目標床反力の床反力モーメント瞬時値として決定する手段を備えることが好ましい（第 4 6 発明）。

これによれば、ロボットのヨー方向の姿勢状態量を目標運動の姿勢状態量に安定に保ちつつ、ロボットのスピンおよびそれに起因する転倒を防止することができる。また、ロボットの移動軌道が目標歩容の軌道からずれたり、ロボットのヨー方向の姿勢の継続的な安定性が損なわれるのを防止できる。

上述のような第 4 4 発明は、例えば前記第 3 4 発明の構成を用いることで、容易に実現できる。すなわち、前記第 3 4 発明において、少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第 3 動力学モデルに入力し、該第 3 動力学モデルの出力としての目標運動の第 3 仮瞬時値を求める第 3 モデル演算手段を備え、前記目標床反力の床反力モーメント補正量の要求値を決定する手段は、前記決定した前記目標運動の目標瞬時値と前記目標運動の第 3 仮瞬時値との差に基づいて、該差が 0 に近づくように前記要求値を決定する（第 4 7 発明）。

かかる第 4 7 発明では、上記第 3 動力学モデルおよび第 3 モデル演算手段がそれぞれ第 4 4 発明における第 1 動力学モデル、第 1 モデル演算手段に相当するものとなる。従って、第 4 7 発明は、第 4 4 発明と同等のものとなり、第 4 4 発明と同様の効果を奏することができる。

また、以上説明した第 2 0 ～第 4 7 発明では、前記目標歩容に追従して動作している前記ロボットの滑りの発生を判断する滑り判断手段を備

## 3 4

え、前記許容範囲設定手段は、該滑り判断手段の判断結果に応じて前記許容範囲を可變的に設定することが好ましい（第 4 8 発明）。

この第 4 8 発明によれば、実際のロボットの滑りの発生の判断結果に応じて制限対象量の許容範囲を可變的に設定するので、ロボットの滑りの発生を確実に抑制できる。なお、滑りの発生があると判断されたときには、許容範囲は、それを狭めるように設定されるべきである。

また、この第 4 8 発明では、例えば、前記第 1 7 ～第 1 9 発明と同様に、滑りの発生を判断することができる。

すなわち、前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体の先端部の対地速度に基づき滑りの発生を判断する（第 4 9 発明）。

あるいは、前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体に作用する実床反力の時間的変化率と該脚体の先端部の対地速度とに基づき、該脚体の見かけばね定数を求める手段を備え、少なくとも該見かけばね定数に基づき滑りの発生を判断する（第 5 0 発明）。

あるいは、前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体に作用する実床反力を、所定周波数の近傍範囲に周波数通過特性を有するバンドパスフィルタに通したものに基づき滑りの発生を判断する（第 5 1 発明）。

これらの第 4 9 ～第 5 1 発明によれば、それぞれ前記第 1 7 ～第 1 9 発明と同様に滑りの発生を判断できる。

なお、滑りの発生の判断は、第 4 9 ～第 5 1 発明のいずれでも行なうことができるが、これらの第 4 9 ～第 5 1 発明の 2 つ以上を組み合わせる滑りの発生の判断を行なうようにしてもよい。

## 25 図面の簡単な説明

図 1 は本発明の実施形態およびこれに関連する参考例における脚式移

動ロボットとしての2足移動ロボットの全体構成を概略的に示す図、図2は図1のロボットの脚体の先端部の構造を示す図、図3は図1のロボットに備えた制御ユニットの構成を示すブロック図、図4は参考例における制御ユニットの機能的構成を示すブロック図である。図5は実施形態および参考例で生成する走行歩容を説明するための図、図6は目標床反力鉛直成分軌道の例を示すグラフ、図7は目標ZMP軌道のX成分およびY成分の例を示すグラフ、図8はロボットの上体並進モードを説明するための図、図9はロボットの上体傾斜モードを説明するための図、図10はロボットの上体ヨー回転モードを説明するための図、図11(a)はロボットの逆位相腕振りモードを平面視で説明するための図、図11(b)はロボットの逆位相腕振りモードを側面視で説明するための図、図12は実施形態で用いる動力学モデルを説明するための図である。図13は参考例における歩容生成装置のメインルーチン処理を示すフローチャート、図14はロボットの発散状態を説明するための図、図15は図13のS022のサブルーチン処理を示すフローチャート、図16は定常歩容と支持脚座標系とを説明するための図、図17は定常歩容の上体軌道と支持脚座標系とを例示する図、図18は基準逆位相腕振り角の例を示すグラフ、図19は定常歩容における目標床反力鉛直成分軌道の設定例を示すグラフ、図20は定常歩容における床反力水平成分許容範囲の設定例を示すグラフ、図21は定常歩容における床反力モーメント鉛直成分許容範囲の設定例を示すグラフ、図22は定常歩容における目標ZMP軌道の設定例を示すグラフである。図23は図13のS024のサブルーチン処理を示すフローチャート、図24は図23のS208のサブルーチン処理を示すフローチャート、図25は図24のS306のサブルーチン処理を示すフローチャート、図26は図25のS412のサブルーチン処理を示すフローチャートである。図27は許容

## 36

範囲を考慮しない床反力水平成分の例を示すグラフ、図 28 は許容範囲を考慮した床反力水平成分の例を示すグラフ、図 29 は上体傾斜角加速度の例を示すグラフ、図 30 はロボットの上下傾斜角を復元するための上下傾斜復元モーメント ZMP 換算値の例を示すグラフ、図 31 は上下傾斜復元モーメント ZMP 換算値を加味した上下傾斜角加速度の例を示すグラフ、図 32 は許容範囲を考慮しない床反力モーメント鉛直成分の例を示すグラフ、図 33 は許容範囲を考慮した床反力モーメント鉛直成分の例を示すグラフ、図 34 は逆位相腕振りモーメントの例を示すグラフ、図 35 は図 34 の逆位相腕振りモーメントに対応する逆位相腕振り角加速度を示すグラフ、図 36 は逆位相腕振り角を復元するための逆位相腕振り復元角加速度の例を示すグラフ、図 37 は図 36 の逆位相腕振り復元角加速度に対応する逆位相腕振り復元モーメントを示すグラフ、図 38 は図 33 の床反力モーメント鉛直成分と図 37 の逆位相腕振り復元モーメントとを合成してなる床反力モーメント鉛直成分を示すグラフである。図 39 は図 13 の S026 のサブルーチン処理を示すフローチャート、図 40 は今回歩容の床反力水平成分許容範囲の設定例を示すグラフ、図 41 は今回歩容の床反力モーメント鉛直成分許容範囲の設定例を示すグラフ、図 42 は図 13 の S028 のサブルーチン処理を示すフローチャート、図 43 は図 42 の S702 のサブルーチン処理を示すフローチャート、図 44 は今回歩容の仮目標 ZMP と ZMP 修正量と修正後の目標 ZMP との例を示すグラフ、図 45 は図 13 の S030 のサブルーチン処理を示すフローチャート、図 46 は図 45 の S1412 のサブルーチン処理を示すフローチャートである。図 47 は定常歩容と目標歩容の上下位置軌道との関係を示すグラフ、図 48 は上下傾斜モード（腰中心の上下傾斜）の他の例を示す図、図 49 は動力学モデルの他の例を説明するための図、図 50 は歩行歩容における目標床反力鉛直成分



の設定例を示す図、図51はロボットの走行歩容における上体鉛直方向位置と床反力鉛直成分との関係を示す図、図52はロボットの歩行歩容における上体鉛直方向位置と床反力鉛直成分との関係を示す図である。

図53は本発明の第1実施形態における制御ユニットの機能的構成を示

5 すブロック図、図54は図53に示す補償全床反力モーメント水平成分

分配器の処理を示すブロック図、図55は図53に示すモデル操作床反

力モーメント鉛直成分決定器の処理を示すブロック図、図56は第1実

施形態における歩容生成装置のメインルーチン処理を示すフローチャ

ート、図57は図56のS3032のサブルーチン処理を示すフローチャ

10 ート、図58は図57のS3414のサブルーチン処理を示すフローチャ

ートである。図59は本発明の第2実施形態における制御ユニットの

機能的構成を示すブロック図、図60は第2実施形態における歩容生成

装置のメインルーチン処理を示すフローチャート、図61は図60のS

2034のサブルーチン処理を示すフローチャート、図62は図61の

15 S2114のサブルーチン処理を示すフローチャートである。図63は

本発明の第3実施形態における歩容生成装置の機能的構成を示すブロッ

ク図、図64は第3実施形態におけるZMP許容範囲の設定例を示す図、

図65は第3実施形態における歩容生成装置のメインルーチン処理を示

すフローチャート、図66は図65のS3536の処理を示すブロッ

20 ク図、図67は図66に示す上体水平位置摂動用モデルを説明するための

図、図68は図66に示す上体姿勢角補正用摂動モデルの説明するた

めの図、図69は図66に示す逆位相腕振り角補正用摂動モデルを説明す

るための図、図70は図66に示す逆位相腕振り角補正用摂動モデルモ

ーメント決定部の処理を示すブロック図である。図71は本発明の第4

25 実施形態における図65のS3536の処理を示すブロック図、図72

は図71に示す逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部の処

理を示すブロック図である。図 7 3 は本発明の第 5 実施形態における歩容生成装置の機能的構成を示すブロック図、図 7 4 は図 7 3 に示す擬似順フルモデルの処理を示すブロック図である。図 7 5 は本発明の第 6 実施形態における図 6 5 の S 3 5 3 6 の処理を示すブロック図である。図 7 6 は本発明の第 7 実施形態における制御ユニットの機能的構成を示すブロック図、図 7 7 は第 7 実施形態における歩容生成装置のメインルーチン処理を示すフローチャート、図 7 8 は図 7 7 の S 2 3 3 4 の処理を示すフローチャート、図 7 9 は図 7 6 に示す滑り判定部の処理を示すフローチャート、図 8 0 ～図 8 2 はそれぞれ図 7 9 の S 5 2 1 0、S 5 2 1 2、S 5 2 1 4 のサブルーチン処理を示すフローチャート、図 8 3 は滑り判定部の判定結果と、許容範囲の低減率と、床反力許容範囲との例を示すグラフ、図 8 4 は第 4 ～第 6 実施形態に関する変形態様の例を示すブロック図、図 8 5 は第 3 実施形態に関する逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部の処理の変形態様の例（第 8 実施形態）を示すブロック図である。

#### 発明を実施するための最良の形態

以下、添付図面を参照してこの発明の実施形態に係る脚式移動ロボットの制御装置を説明する。尚、脚式移動ロボットとしては 2 足移動ロボットを例にとる。

まず、図 1 ～図 4 7 を参照して、本発明の脚式移動ロボットの制御装置に関連する参考例を説明しておく。後述する本発明の実施形態は、その機能的構成はこの参考例と同一であり、また、ロボットの歩容生成処理および制御処理の一部のみが当該参考例と相違するものである。従って、後述する実施形態の説明では、この参考例の説明をしばしば援用する。補足すると、図 1 と後述の図 2、図 3 並びに図 5 ～図 1 2 を参照し

て説明する事項は、後述の実施形態においても同一である。

図1は、この参考例に係る脚式移動ロボットとしての2足移動ロボットを全体的に示す概略図である。

図示の如く、2足移動ロボット（以下、ロボットという）1は上体  
5（ロボット1の基体）3から下方に延設された左右一対の脚体（脚部リンク）2，2を備える。両脚体2，2は同一構造であり、それぞれ6個の関節を備える。その6個の関節は上体3側から順に、股（腰部）の回旋（回転）用（上体3に対するヨー方向の回転用）の関節10R，10L（符号R，Lはそれぞれ右側脚体、左側脚体に対応するものであること  
10とを意味する符号である。以下同じ）と、股（腰部）のロール方向（X軸まわり）の回転用の関節12R，12Lと、股（腰部）のピッチ方向（Y軸まわり）の回転用の関節14R，14Lと、膝部のピッチ方向の回転用の関節16R，16Lと、足首のピッチ方向の回転用の関節18R，18Lと、足首のロール方向の回転用の関節20R，20Lとから  
15構成される。

各脚体2の足首の2つの関節18R（L），20R（L）の下部には、各脚体2の先端部を構成する足平（足部）22R（L）が取着されると共に、両脚体2，2の最上位には、各脚体2の股の3つの関節10R（L），12R（L），14R（L）を介して前記上体3が取り付けられ  
20ている。上体3の内部には、詳細を後述する制御ユニット60などが格納される。なお、図1では図示の便宜上、制御ユニット60を上体3の外部に記載している。

上記構成の各脚体2においては、股関節（あるいは腰関節）は関節10R（L），12R（L），14R（L）から構成され、膝関節は関節16R（L）から構成され、足首関節は関節18R（L），20R（L）  
25から構成される。また股関節と膝関節とは大腿リンク24R（L）で連

## 40

結され、膝関節と足首関節とは下腿リンク 26 R (L) で連結される。

上体 3 の上部の両側部には左右一对の腕体 5, 5 が取り付けられると共に、上体 3 の上端部には頭部 4 が配置される。各腕体 5 は、3 つの関節 30 R (L), 32 R (L), 34 R (L) から構成された肩関節と、  
5 関節 36 R (L) から構成された肘関節と、関節 38 R (L) から構成された手首関節と、この手首関節に連結された手先部 40 R (L) とを備えている。なお、頭部 4 は、本発明の要旨と直接的な関連を有しないため詳細な説明を省略する。

上記の構成により、各脚体 2 の足平 22 R (L) は、上体 3 に対して  
10 6 つの自由度を与えられている。そして、ロボット 1 の歩行等の移動中に、両脚体 2, 2 を合わせて  $6 * 2 = 12$  個 (この明細書で「\*」はスカラに対する演算としては乗算を、ベクトルに対する演算としては外積を示す) の関節を適宜な角度で駆動することで、両足平 22 R, 22 L の所望の運動を行うことができる。これにより、ロボット 1 は任意に 3  
15 次元空間を移動することができる。また、各腕体 5 は、その肩関節、肘関節、手首関節の回転によって、腕振り等の運動を行うことができる。

図 1 に示す如く、各脚体 2 の足首関節 18 R (L), 20 R (L) の下方には足平 22 R (L) との間に公知の 6 軸力センサ 50 が介装されている。該 6 軸力センサ 50 は、各脚体 2 の足平 22 R (L) の着地の  
20 有無、および各脚体 2 に作用する床反力 (接地荷重) 等を検出するためのものであり、該床反力の並進力の 3 方向成分  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  並びにモーメントの 3 方向成分  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  の検出信号を制御ユニット 60 に出力する。また、上体 3 には、Z 軸 (鉛直方向 (重力方向)) に対する上体 3 の傾斜角およびその角速度、並びに Z 軸回りの上体 3 の回転  
25 角 (ヨー角) およびその角速度を検出するための姿勢センサ 54 が備えられ、その検出信号が該姿勢センサ 54 から制御ユニット 60 に出力さ

れる。この姿勢センサ 5 4 は、図示を省略する 3 軸方向の加速度センサ  
および 3 軸方向のジャイロセンサを備え、これらのセンサの検出信号が  
上体 3 の姿勢角（傾斜角およびヨー角）およびその角速度を検出するた  
めに用いられると共に、ロボット 1 の自己位置姿勢を推定するために用  
5 いられる。また、詳細構造の図示は省略するが、ロボット 1 の各関節に  
は、それを駆動するための電動モータ 6 4（図 3 参照）と、その電動モ  
ータ 6 4 の回転量（各関節の回転角）を検出するためのエンコーダ（ロ  
ータリエンコーダ）6 5（図 3 参照）とが設けられ、該エンコーダ 6 5  
の検出信号が該エンコーダ 6 5 から制御ユニット 6 0 に出力される。

10 さらに、図 1 では図示を省略するが、ロボット 1 の適宜な位置にはジ  
ョイスティック（操作器）7 3（図 3 参照）が設けられ、そのジョイス  
ティック 7 3 を操作することで、直進移動しているロボット 1 を旋回さ  
せるなど、ロボット 1 の歩容に対する要求を必要に応じて制御ユニット  
6 0 に入力できるように構成されている。

15 図 2 は本参考例における各脚体 2 の先端部分（各足平 2 2 R（L）を  
含む）の基本構成を概略的に示す図である。同図に示すように、各足平  
2 2 R（L）の上方には、前記 6 軸力センサ 5 0 との間にばね機構 7 0  
が装備されると共に、足底（各足平 2 2 R（L）の底面）にはゴムなど  
からなる足底弾性体 7 1 が貼られている。これらのばね機構 7 0 及び足  
20 底弾性体 7 1 によりコンプライアンス機構 7 2 が構成されている。ばね  
機構 7 0 は詳細は後述するが、足平 2 2 R（L）の上面部に取り付けら  
れた方形状のガイド部材（図示省略）と、足首関節 1 8 R（L）（図 2  
では足首関節 2 0 R（L）を省略している）および 6 軸力センサ 5 0 側  
に取り付けられ、前記ガイド部材に弾性材（ゴムやばね）を介して微動  
25 自在に収納されるピストン状部材（図示省略）とから構成されている。

図 2 に実線で表示された足平 2 2 R（L）は、床反力を受けていない

## 42

ときの状態を示している。各脚体2が床反力を受けると、コンプライアンス機構72のばね機構70と足底弾性体71とがたわみ、足平22R(L)は図中に点線で例示したような位置姿勢に移る。このコンプライアンス機構72の構造は、例えば本出願人が先に提案した特開平5-305584号公報に詳細に説明されている如く、着地衝撃を緩和するためだけでなく、制御性を高めるためにも重要なものである。

図3は制御ユニット60の構成を示すブロック図である。該制御ユニット60はマイクロコンピュータにより構成されており、CPUからなる第1の演算装置90及び第2の演算装置92、A/D変換器80、カウンタ86、D/A変換器96、RAM84、ROM94、並びにこれらの間のデータ授受を行うバスライン82を備えている。この制御ユニット60では、各脚体2の6軸力センサ50、姿勢センサ54（加速度センサおよびレートジャイロセンサ）、ジョイスティック73等の出力信号はA/D変換器80でデジタル値に変換された後、バスライン82を介してRAM84に送られる。またロボット1の各関節のエンコーダ65（ロータリーエンコーダ）の出力は、カウンタ86を介してRAM84に入力される。

前記第1の演算装置90は後述の如く目標歩容を生成すると共に、関節角変位指令（各関節の変位角もしくは各電動モータ64の回転角の指令値）を算出し、RAM84に送出する。また第2の演算装置92はRAM84から関節角変位指令と、前記エンコーダ65の出力信号に基づいて検出された関節角の実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な操作量を算出してD/A変換器96とサーボアンプ64aとを介して各関節を駆動する電動モータ64に出力する。

図4は、この参考例に係る脚式移動ロボットの制御装置の機能的構成を全体的に示すブロック図である。この図4中の「実ロボット」の部分

以外の部分が制御ユニット60が実行する処理機能（主として第1の演算装置90及び第2の演算装置92の機能）によって構成されるものである。なお、以下の説明では、脚体2および腕体5の左右を特に区別する必要がないときは、前記符号R、Lを省略する。

- 5      以下説明すると、制御ユニット60は、ロボット1の目標歩容を自在かつリアルタイムに生成して出力する歩容生成装置100を備えている。該歩容生成装置100は、その機能によって、本願発明の各手段を構成するものである。この歩容生成装置100が出力する目標歩容は、目標上体位置姿勢軌道（上体3の目標位置及び目標姿勢の軌道）、目標足平位置姿勢軌道（各足平22の目標位置及び目標姿勢の軌道）、目標腕姿勢軌道（各腕体5の目標姿勢の軌道）、目標全床反力中心点（目標ZMP）軌道、目標全床反力軌道から構成される。なお、脚体2や腕体5以外に上体3に対して可動な部位を備える場合には、その可動部位の目標位置姿勢軌道が目標歩容に加えられる。
- 10      ここで、上記歩容における「軌道」は時間的変化のパターン（時系列パターン）を意味し、以下の説明では、「軌道」の代わりに「パターン」と称することもある。また、「姿勢」は空間的な向きを意味する。具体的には、例えば上体姿勢はZ軸（鉛直軸）に対するロール方向（X軸まわり）の上体3の傾斜角とピッチ方向（Y軸まわり）の上体3の傾斜角とヨー方向（Z軸まわり）の上体3の回転角（ヨー角）とで表され、足平姿勢は各足平22に固定的に設定された2軸の空間的な方位角で表される。本明細書では、上体姿勢は上体姿勢角ということもある。また、上体姿勢のうち、鉛直方向に対する姿勢を上体姿勢傾斜もしくは上体姿勢傾斜角ということもある。
- 20      尚、以下の説明では、誤解を生じるおそれがない場合には、しばしば「目標」を省略する。また、歩容のうちの、床反力に係わる構成要素以
- 25

## 4 4

5 外の構成要素、すなわち足平位置姿勢、上体位置姿勢等、ロボット 1 の運動に係わる歩容を総称的に「運動」という。また、各足平 2 2 に作用する床反力（並進力及びモーメントからなる床反力）を「各足平床反力」と呼び、ロボット 1 の全て（2 つ）の足平 2 2 R, 2 2 L についての「各足平床反力」の合力を「全床反力」という。ただし、以下の説明においては、各足平床反力はほとんど言及しないので、特に断らない限り、「床反力」は「全床反力」と同義として扱う。

10 目標床反力は、一般的には、作用点とその点に作用する並進力及びモーメントによって表現される。作用点はどこにとっても良いので、同一の目標床反力でも無数の表現が考えられるが、特に目標床反力中心点（全床反力の中心点の目標位置）を作用点にして目標床反力を表現すると、目標床反力のモーメント成分は、鉛直成分（鉛直軸（Z 軸）まわりのモーメント）を除いて零になる。換言すれば、目標床反力中心点まわりの目標床反力のモーメントの水平成分（水平軸（X 軸及び Y 軸）回りのモーメント）は零になる。

20 尚、動力学的平衡条件を満足する歩容では、ロボット 1 の目標運動軌道から算出される Z M P（目標運動軌道から算出される慣性力と重力との合力がその点まわりに作用するモーメントが、鉛直成分を除いて零になる点）と目標床反力中心点是一致的ことから、目標床反力中心点軌道の代わりに目標 Z M P 軌道を与えても同じことである（詳細は、本願出願人による P C T 公開公報 WO/02/40224 等を参照）。

このような背景から、上記 P C T 公開公報 WO/02/40224 の明細書では目標歩容を、次のように定義していた。

25 a) 広義の目標歩容とは、1 歩ないしは複数歩の期間の目標運動軌道とその目標床反力軌道との組である。

b) 狭義の目標歩容とは、1 歩の期間の目標運動軌道とその Z M P 軌道



との組である。

c)一連の歩容は、いくつかの歩容がつながったものとする。

歩行においては、本出願人が先に特開平10-86080号公報で提案した上体高さ決定手法によってロボット1の上体3の鉛直位置（上体  
5 高さ）が決定されると、並進床反力鉛直成分は従属的に決定される。さらに、目標歩容の運動による慣性力と重力との合力が目標ZMPまわりに発生するモーメントの水平成分が零になるようにロボット1の上体水平位置軌道を決定することで、並進床反力水平成分も決定される。このため、PCT公開公報WO/02/40224の明細書では、目標歩容の床反  
10 力に関して明示的に設定すべき物理量としては、目標ZMPだけで十分であった。したがって、狭義の目標歩容の定義としては、上記のb)で十分であった。それに対し、本参考例で説明するロボット1の走行歩容（詳細は後述する）においては、床反力鉛直成分（並進床反力鉛直成分）も制御上重要である。このため本発明では、この床反力鉛直成分の  
15 目標軌道を明示的に設定した上で、ロボット1の目標上体鉛直位置等の軌道を決定する。そこで、本明細書では、狭義の目標歩容の定義として、次のb')を用いる。

b') 狭義の目標歩容とは、1歩の期間の目標運動軌道と、その目標ZMP軌道と目標並進床反力鉛直成分軌道とを少なくとも含む目標床反力  
20 軌道との組である。

この明細書では以降、理解を容易にするために、特にことわらない限り、目標歩容は上記b')の狭義の目標歩容の意味で使用する。この場合、目標歩容の「1歩」は、ロボット1の片方の脚体2が着地してからもう一方の脚体2が着地するまでの意味で使用する。補足すると、本明  
25 細書の参考例および実施形態では、目標歩容は1歩の期間分の歩容の意味で使用するが、それは必ずしも1歩の期間分のものである必要はなく、

複数歩分、あるいは1歩よりも短い（例えば半歩など）の期間分の歩容であってもよい。尚、以下の説明では、「床反力鉛直成分」は「並進床反力鉛直成分」を意味するものとし、床反力のうちのモーメントの鉛直成分（鉛直軸回り成分）は、「モーメント」という用語を用いて「床反力鉛直成分」と区別をする。同様に、「床反力水平成分」は「並進床反力水平成分」を意味するものとする。

また、歩容における両脚支持期とは言うまでもなく、ロボット1がその自重を両脚体2, 2で支持する期間、片脚支持期とはいずれか一方のみの脚体2でロボット1の自重を支持する期間、空中期とは両脚体2, 2が床から離れている（空中に浮いている）期間を言う。片脚支持期においてロボット1の自重を支持しない側の脚体2を「遊脚」と呼ぶ。尚、本参考例で説明する走行歩容では、両脚支持期は無く、片脚支持期（着地期）と空中期とが交互に繰り返される。この場合、空中期では両脚体2, 2とも、ロボット1の自重を支持しないこととなるが、該空中期の直前の片脚支持期において遊脚であった脚体2、支持脚であった脚体2をそれぞれ該空中期においても遊脚、支持脚と呼ぶ。

図5に示す走行歩容を例にして、歩容生成装置100が生成する目標歩容の概要を説明する。なお、歩容に関するその他の定義および詳細は、先に本願出願人が提案した特開平10-86081号公報にも記載されているので、以下では、特開平10-86081号公報に記載されていない内容を主に説明する。

まず、図5に示す走行歩容を説明する。この走行歩容は、人間の通常的な走行歩容と同様の歩容である。この走行歩容では、ロボット1の左右いずれか一方のみの脚体2（支持脚）の足平22が着地（接地）する片脚支持期と、両脚体2, 2が空中に浮く空中期とが交互に繰り返される。図5の1番目の状態は片脚支持期の開始時（初期）の状態、2番目

の状態は片脚支持期中間時点の状態、3番目の状態は片脚支持期に続く空中期の開始時（片脚支持期の終了時）の状態、4番目の状態は空中期中間時点の状態、5番目の状態は空中期の終了時（次の片脚支持期の開始時）の状態を示している。

- 5      この走行歩容では、ロボット1は、図5の1番目の状態で示すように、片脚支持期の開始時において支持脚（ロボット1の進行方向前側の脚体2）側の足平22のかかとで着地する。続いて、図5の2番目の状態で示すように、ロボット1は、着地した足平22（支持脚側の足平22）の底面のほぼ全面を着地させた後、図5の3番目の状態で示すように、
- 10    その支持脚側の足平22（図5の3番目の状態におけるロボット1の進行方向後側の脚体2の足平22）のつま先で床を蹴って空中に飛び上がる。これより片脚支持期が終了すると共に空中期が開始する。尚、片脚支持期における遊脚は、図5の1番目の状態で示すように、片脚支持期の開始時では、支持脚の後側に存在するが、図5の2番目及び3番目の
- 15    状態で示すように次の着地予定位置に向かって支持脚の前側に振り出される。次いで、図5の4番目の状態で示す空中期を経た後、ロボット1は、遊脚（空中期の開始直前の片脚支持期で遊脚となっていた脚体2）の足平22のかかとで着地し、次の片脚支持期が開始される。

- 図5の走行歩容を考慮しつつ、前記歩容生成装置100が生成する目
- 20    標歩容の基本的な概要を説明する。詳細は後述するが、歩容生成装置100が目標歩容を生成するとき、遊脚側の足平22の着地位置姿勢（着地予定位置姿勢）や着地時刻（着地予定時刻）等の目標歩容生成用の基本的な要求値（要求パラメータ）が、前記ジョイスティック73の所要の操作等に応じて歩容生成装置100に与えられる。そして、歩容生成
- 25    装置100は、その要求パラメータを用いて目標歩容を生成する。より詳しく言えば、歩容生成装置100は、上記要求パラメータに応じて、

目標歩容の目標足平位置姿勢軌道、目標床反力鉛直成分軌道等、目標歩容の一部の構成要素を規定するパラメータ（歩容パラメータという）を決定した上で、その歩容パラメータを用いて目標歩容の瞬時値を逐次決定し、該目標歩容の時系列パターンを生成する。

- 5       この場合、目標足平位置姿勢軌道（より詳しくは、足平の位置及び姿勢の空間的な各成分（X軸成分等）の目標軌道）は、例えば本出願人が特許第3233450号にて提案した有限時間整定フィルタを用いて各足平22毎に生成される。この有限時間整定フィルタは、可変時定数の1次遅れフィルタ、すなわち、伝達関数が  $1 / (1 + \tau s)$  の形で表されるフィルタ（ $\tau$ は可変の時定数。以下、このフィルタを単位フィルタ
- 10       という）を複数段（本参考例では3段以上）、直列に接続したものであり、所望の指定時刻に指定値に到達するような軌道を生成・出力することができるものである。この場合、各段の単位フィルタの時定数 $\tau$ は、いずれも、有限時間整定フィルタの出力生成を開始してから、上記指定
- 15       時刻までの残時間に応じて逐次可變的に設定される。より詳しくは、該残時間が短くなるに伴い $\tau$ の値が所定の初期値（ $> 0$ ）から減少されていき、最終的には、該残時間が0になる指定時刻にて、 $\tau$ の値が0になるように設定される。そして、有限時間整定フィルタには、前記指定値（より詳しくは、有限時間整定フィルタの出力の初期値から前記指定値
- 20       への変化量）に応じた高さのステップ入力を与えられる。このような有限時間整定フィルタは、指定時刻にて指定値に達するような出力が生成されるだけでなく、指定時刻における有限時間整定フィルタの出力の変化速度を0もしくはほぼ0にすることができる。特に、単位フィルタを3段以上（3段でよい）、接続した場合には、有限時間整定フィルタの
- 25       出力の変化加速度（変化速度の微分値）をも0もしくはほぼ0にすることができる。

尚、上記のように有限時間整定フィルタにより生成される目標足平位置姿勢軌道は、床面に固定された後述の支持脚座標系での各足平 2 2 の目標位置姿勢軌道である。

上述のように生成される目標足平位置姿勢軌道は、各足平 2 2 の位置が、その初期接地状態（目標歩容の初期時刻の状態）から着地予定位置に向かって徐々に加速しながら移動を開始するように生成される。そして、該目標足平位置姿勢軌道は、最終的に着地予定時刻までに徐々に位置の変化速度を 0 またはほぼ 0 にまで減速し、着地予定時刻にて着地予定位置に到達して停止するように生成される。このため、各足平 2 2 の着地瞬間における対地速度（床に固定された支持脚座標系での各足平 2 2 の位置の変化速度）が 0 またはほぼ 0 になる。したがって、走行歩容において同時に全脚体 2, 2 が空中に存在する状態（空中期での状態）から着地しても、着地衝撃が小さくなる。

前記走行歩容においては、ロボット 1 に作用する重力によって空中期後半から上体 3 の鉛直速度は下向きになり、着地時でも下向きのままである。したがって、上記のように各足平 2 2 の着地瞬間における対地速度が 0 またはほぼ 0 になるように目標足平位置姿勢軌道を生成すると共に、後述する如く動力的平衡条件を満たすように上体 3 の目標位置姿勢軌道を生成したとき、着地直前において、上体 3 に対する遊脚側の足平 2 2 の相対速度は、上向きになる。すなわち、走行歩容の着地瞬間では、ロボット 1 の目標歩容は遊脚側の脚体 2 2 を上体 3 側に引っ込めながら着地するような歩容となる。言い換えれば、本参考例での目標歩容では、ロボット 1 は、着地瞬間において、遊脚側の足平 2 2 の対地速度が 0 またはほぼ 0 になるように、上体 3 から見て該足平 2 2 を引き上げるようにして着地する。これによって、着地衝撃は小さくなり、着地衝撃が過大になるのを防止するようにしている。

また、本参考例では、有限時間整定フィルタは、単位フィルタを3段以上（例えば3段）、直列に接続したものであるため、着地予定時刻までに各足平22の速度（足平位置の変化速度）が0またはほぼ0になるだけでなく、各足平22は、その加速度も着地予定時刻にて0またはほぼ0になって停止する。つまり、着地瞬間における対地加速度も0またはほぼ0になる。したがって、着地衝撃がより一層小さくなる。特に、実際のロボット1の着地時刻が目標の着地時刻からずれても、衝撃があまり増大しなくなる。補足すると、着地予定時刻にて各足平22の対地速度を0またはほぼ0にする上では、有限時間整定フィルタの単位フィルタの段数は2段でもよいが、この場合には、着地予定時刻での各足平22の加速度は一般には0にならない。

尚、足平姿勢に関しては、各足平22が着地予定時刻にてその踵で着地した後、該足平22の底面のほぼ全面が床に接地するまで動き続ける。このため、該足平22の底面のほぼ全面が床に接地する時刻を前記指定時刻に設定して、前記有限時間整定フィルタにより足平姿勢軌道が生成される。

また、本参考例では、有限時間整定フィルタを用いて足平位置軌道を生成したが、着地予定時刻での足平位置の変化速度（足平位置の時間微分値）が0またはほぼ0になるように、さらには、該着地予定時刻での足平位置の変化加速度（変化速度の時間微分値）が0またはほぼ0になるように設定された多項式などの関数を用いて目標足平位置軌道を生成するようにしても良い。このことは、目標足平姿勢軌道の生成に関しても同様である。但し、該目標足平姿勢軌道の生成に関しては、上述の如く、各足平22の底面のほぼ全面が床に設置する時刻にて、各足平22の姿勢の変化速度、さらにはその変化加速度が0またはほぼ0になるように多項式などの関数が設定される。

目標床反力鉛直成分軌道は、例えば図6のように設定される。本参考例では、走行歩容における目標床反力鉛直成分軌道の形状（詳しくは片脚支持期での形状）は、台形状（床反力鉛直成分の増加側に凸の形状）に定められており、その台形の高さ、折れ点の時刻を目標床反力鉛直成分軌道を規定する歩容パラメータとして、それらの歩容パラメータ（床反力鉛直成分軌道パラメータ）が決定される。尚、走行歩容の空中期では、目標床反力鉛直成分は定常的に0に設定される。この例のように、目標床反力鉛直成分軌道は、実質的に連続になるように（値が不連続にならないように）設定するのが良い。これは床反力を制御する際のロボット1の関節の動作を滑らかにするためである。尚、「実質的に連続」というのは、アナログ的に連続な軌道（真の意味での連続な軌道）を離散時間系でデジタル表現したときに必然的に生じる値の飛びは、該軌道の連続性を失わせるものではないということを意味するものである。

目標ZMP軌道は次のように設定される。図5の走行歩容においては、前記したように支持脚側足平22のかかとで着地し、次にその支持脚側足平22のつま先で蹴って空中に飛び上がり、最後に遊脚側足平22のかかとで着地する。したがって、片脚支持期での目標ZMP軌道は、図7の上段図に示すように、支持脚側足平22のかかとを初期位置として、次に支持脚側足平22の底面のほぼ全面が接地する期間において該足平22の前後方向の中央に移動し、その後、離床時まで支持脚側足平22のつま先に移動するように設定される。ここで、図7の上段図は、X軸方向（前後方向）の目標ZMP軌道を示すものであり、図7の下段図はY軸方向（左右方向）の目標ZMP軌道を示すものである。尚、片脚支持期におけるY軸方向の目標ZMP軌道は、図7の下段図に示すように、Y軸方向での支持脚側脚体2の足首関節の中心位置と同じ位置に設定される。

走行歩容では、さらに片脚支持期の終了後、両脚体 2, 2 が床から離れ、床反力鉛直成分が 0 になる。床反力鉛直成分が 0 の時、すなわち空中期には、ロボット 1 の全体重心は自由落下運動をし、全体重心まわりの角運動量変化は零である。この時、床の任意の点において、ロボット 1 に作用する重力と慣性力との合力のモーメントは 0 であるので、目標 ZMP は不定である。すなわち、床のいずれの点も、「重力と慣性力との合力が作用するモーメントの水平成分が 0 である作用点」という ZMP の条件を満たす。言い換えれば、任意の点に目標 ZMP を設定しても、上記合力が目標 ZMP 回りに作用するモーメントの水平成分が 0 であるという動力学的平衡条件を満足する。したがって、目標 ZMP を不連続に設定しても構わない。例えば、空中期では、目標 ZMP を、離床時（片脚支持期の終了時）の目標 ZMP 位置から移動しないように設定し、空中期終端において、着地時の目標 ZMP 位置に不連続（ステップ状）に移動するように該目標 ZMP 軌道を設定しても構わない。しかし本参考例では、図 7 の上段図に示すように、空中期における目標 ZMP 軌道の X 軸方向位置は、次の遊脚側脚体 2 の着地までに支持脚側足平 2 2 のつまさきから遊脚側足平 2 2 のかかとの着地位置まで連続的に移動するようにした。また、図 7 の下段図に示すように、空中期における目標 ZMP 軌道の Y 軸方向位置は、次の遊脚側脚体 2 の着地までに支持脚側脚体 2 の足首関節の中心の Y 軸方向位置から遊脚側脚体 2 の足首関節の中心の Y 軸方向位置まで連続的に移動するようにした。すなわち、歩容の全期間において目標 ZMP 軌道を連続（実質的に連続）にした。そして、後述するように、目標 ZMP まわりの重力と慣性力との合力のモーメント（鉛直成分を除く）が零になるように目標歩容を生成する（より具体的に目標上体位置姿勢軌道を調整する）ようにした。モデルの近似誤差を考慮すると、生成された歩容が滑らかになるようにするために、空



中期においても目標ZMP軌道を連続（実質的に連続）にしておくのが望ましい。但し、本参考例で用いる後述の動力学モデルでは、目標ZMPの位置によらずに、目標ZMP回りのモーメントの水平成分をある値（その値は本参考例では0であるが、後述の実施形態では必ずしも0ではない）にするような目標歩容を一義的に生成できるので、必ずしも目標ZMPを連続にしておく必要はない。

尚、本参考例では、図7に示したような目標ZMP軌道の折れ点の位置や時刻が、ZMP軌道パラメータ（目標ZMP軌道を規定するパラメータ）として設定される。また、上記したZMP軌道の「実質的に連続」の意味は、前記床反力鉛直成分軌道の場合と同様である。

ZMP軌道パラメータは、安定余裕が高く、かつ急激な変化をしないように決定される。ここで、ロボット1の接地面を含む最小の凸多角形（いわゆる支持多角形）の中央付近に目標ZMPが存在する状態を安定余裕が高いと言う（詳細は特開平10-86081号公報を参照）。図7の目標ZMP軌道はこのような条件を満たすように設定したものである。

また、目標上体位置姿勢、目標足平位置姿勢および後述の基準上体姿勢はグローバル座標系で記述される。グローバル座標系は床に固定された座標系である。グローバル座標系としては、より具体的には、後述する支持脚座標系が用いられる。

本参考例では、歩容生成装置100は、目標上体姿勢だけでなく、基準上体姿勢も生成する。この基準上体姿勢は、歩容に対する要求（歩容生成装置100に対する行動計画部などの装置または外部（前記ジョイスティック73等）からの要求）にそのまま従って生成される上体姿勢である。

目標上体姿勢（以降、「基準」が付いていない場合には、目標上体姿

勢を表す)は、長期的には基準上体姿勢に追従するかまたは一致するように生成される。

目標上体姿勢は、歩行においては、本願出願人によるPCT公開公報 WO/02/40224 の明細書に記載した実施形態のごとく通常、常に基準  
5 上体姿勢に一致させておけば良い。PCT公開公報 WO/02/40224 では、基準上体姿勢という概念は記載されていないが、目標上体姿勢パターンを、明示的かつ優先的に与えていたので、基準上体姿勢に目標上体姿勢が常に一致していることと同じことである。

しかし、走行など空中期がある歩容や低摩擦床面での歩行においては、  
10 単に上体水平加速度等を調整するだけでは、目標歩容の床反力水平成分と床反力モーメント鉛直成分とが許容範囲以内(あるいは摩擦限界以内)に存在するようにしつつ動力学的平衡条件を満足することができない。

そこで、本参考例においては、目標上体姿勢を必要に応じて基準上体  
15 姿勢から故意にずらすこととした。より具体的には、以下に説明する運動モードを複合的に発生させることにより、目標歩容の床反力水平成分や床反力モーメント鉛直成分が許容範囲以内(あるいは摩擦限界以内)に存在しつつ動力学的平衡条件を満足させるようにした。

図8のように、ロボット1のある運動状態から、上体水平加速度だけ  
20 を摂動(微小変化)させると、ロボット1の全体重心水平加速度と全体重心まわりの角運動量が摂動する。すなわち、上体水平加速度の摂動は、それによって発生するロボット1の慣性力と重力との合力に対して動力学的に釣り合う床反力鉛直成分を摂動させずに(ロボット1の全体重心鉛直加速度を摂動させずに)、目標ZMPまわりの床反力モーメント水  
25 平成分(水平軸まわり成分)と床反力水平成分とを摂動させる。このようにロボット1の上体水平加速度を摂動させる運動モードを上体並進モ

ードと呼ぶ。

言いかえると、床反力鉛直成分を変化させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分と床反力水平成分とを変化させる運動を上体並進モードと呼ぶ。尚、上体並進モードでは、床反力モーメント鉛直成分（鉛直軸まわり成分）も振動するが、ここではこの点に注目しない。

この時の単位加速度当たりの床反力モーメント水平成分の変化を $\Delta M_p$ 、単位加速度当たりの床反力水平成分の変化を $\Delta F_p$ とする。図8に示す状況で上体3を前方に水平加速すると、 $\Delta M_p$ と $\Delta F_p$ は図8に示す矢印の向きに作用する。

10 感覚的に判り易くするために、運動によって発生する慣性力と重力との合力に釣り合う床反力を用いて表現したが、慣性力と重力との合力を用いて表現した方が、理論的には的確である。なお、上記合力と床反力とは、互いに大きさが同じで向きが逆になっている。

それに対し、図9のように、ロボット1のある運動状態から、ある点Prまわりに上体傾斜角加速度（上体3の傾斜角の角加速度）を振動させると、ロボット1の全体重心は振動せずに、全体重心まわりの角運動量（鉛直軸まわり成分を除く）が振動する。すなわち、点Prまわりの上体傾斜角加速度の振動は、床反力鉛直成分と床反力水平成分とを振動させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分を振動させる。

20 このようにロボット1の上体傾斜角加速度を振動させる運動モードを上体傾斜モードと呼ぶ。

言いかえると、床反力鉛直成分と床反力水平成分を変化させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分を変化させる運動を上体傾斜モードと呼ぶ。

25 この時の単位角加速度当たりの床反力モーメント水平成分の変化を $\Delta M_r$ 、単位角加速度当たりの床反力水平成分の変化を $\Delta F_r$ とする。 $\Delta$

$F_r$  は零である。図 9 に示す状況で上体 3 が前傾するように上体傾斜角の角加速度を発生させると、 $\Delta M_r$  は図 9 に示す矢印の向きに作用する。

また、図 10 のように、ロボット 1 のある運動状態から、ある点  $P_q$  まわりに上体ヨー角加速度（上体 3 の鉛直軸まわりの回転角加速度）を  
5 振動させると、ロボット 1 の全体重心は振動せずに、全体重心まわりの角運動量鉛直成分が振動する。ところで、ロボット 1 の全体重心が振動しなければ、角運動量鉛直成分の振動は、作用点に依存しない。したがって、点  $P_q$  まわりの上体ヨー角加速度の振動は、床反力鉛直成分、床反力水平成分および床反力モーメント水平成分を振動させずに、目標 Z  
10 MP まわりの床反力モーメント鉛直成分を振動させる。このようにロボット 1 の上体ヨー角加速度を振動させる運動モードを上体ヨー回転モードと呼ぶ。

言いかえると、床反力鉛直成分、床反力水平成分および床反力モーメント水平成分を変化させずに、目標 Z MP まわりの床反力モーメント鉛  
15 直成分を変化させる上体運動を上体ヨー回転モードと呼ぶ。

この時の単位角加速度当たりの床反力モーメント鉛直成分の変化を  $\Delta M_{bz}$ 、単位角加速度当たりの床反力水平成分の変化を  $\Delta F_b$  とする。 $\Delta F_b$  は零である。図 10 に示す状況で上体 3 を矢印の向きに単位角加速度で回転させる（角加速度  $\beta_b=1$  で回転させる）と、 $\Delta M_{bz}$  は図 10  
20 に示す矢印の向きに作用する。

尚、図 10 に示す運動では、両腕体 5、5 の手先位置が支持脚座標系（床に固定された座標系）から見て変わらないように、上体 3 を回転させたが、上体 3 に対する腕体 5 の相対位置姿勢を変えずに、上体 3 と共に腕体 5 を回転させる運動を上体ヨー回転モードと定義しても良い。た  
25 だし、この場合には、後述する運動方程式に若干変更が必要である。

また、図 11 (a), (b) のように、ロボット 1 のある運動状態から、

両腕体 5, 5 の先端を互いに前後に逆方向に振動させると、ロボット 1 の全体重心は振動せずに、全体重心まわりの角運動量鉛直成分が振動する。以降、この運動モードを逆位相腕振りモードと呼ぶ。言い換えると、床反力鉛直成分、床反力水平成分および床反力モーメント水平成分を振動させずに、目標 ZMP まわりの床反力モーメント鉛直成分を振動させる腕振り運動モードを逆位相腕振りモードと呼ぶ。

右腕体 5 R を前側に単位量移動させ、左腕体 5 L を後ろに単位量移動させる動作を、単位角度の逆位相腕振りと呼ぶ。図 11 (a), (b) は、逆位相腕振り角度が  $\theta_{az}$  の状態を表す。

10 逆位相腕振りモードの単位角加速度当たりの床反力モーメント鉛直成分の変化を  $\Delta M_{az}$ 、単位角加速度当たりの床反力水平成分の変化を  $\Delta F_a$  とする。 $\Delta F_a$  は零である。図 11 (a), (b) に示す状況で右腕体 5 R を前側に加速し、左腕体 5 L を後ろ側に加速する（角加速度  $\beta_a > 0$  で振る）と、図 11 (a) に示す矢印の向き（鉛直軸の正の向き）に  
15 床反力モーメント鉛直成分  $M_{az}$  が作用する。

次に、本参考例に用いられるロボット 1 の動力学モデルについて説明する。本参考例では単純化された（近似された）以下に示す動力学モデルを用いる。ただし、以下に示す動力学モデルに関しては、キネマティクスモデル（関節、リンクの構造や寸法を表すモデルであり、言い換え  
20 ると、関節変位とリンクの位置姿勢との関係を表すモデルである。）も必要である。

図 12 は、本参考例に用いられるロボット 1 の動力学モデルである。図示の如く、この動力学モデルは、ロボット 1 の各脚体 2 にそれぞれ対応する 2 つの質点  $2m$ ,  $2m$ 、及び上体 3 に対応する質点  $3m$  からなる  
25 合計 3 質点と、イナーシャがあって質量のない 4 つのフライホイール  $F_{Hx}$ ,  $F_{Hy}$ ,  $F_{Hbz}$ ,  $F_{Haz}$  とから構成されるモデルである。フライ

ホイール  $F H_x$ 、 $F H_y$ 、 $F H_{bz}$ 、 $F H_{az}$  は、それぞれ X 軸（前後方向軸）、Y 軸（左右方向軸）、Z 軸（鉛直軸）、Z 軸（鉛直軸）の回りに回転可能なものである。この動力学モデルでは、デカップルド、即ち、脚体 2、2 の動力学（各質点 2 m、2 m の動力学）と上体 3 の動力学（質点 3 m 及びフライホイール  $F H_x$ 、 $F H_y$  および  $F H_{bz}$  の動力学）と腕体 5、5 の動力学（フライホイール  $F H_{az}$  の動力学）とが相互に非干渉に構成されると共に、ロボット 1 全体の動力学は、それらの線形結合で表される。また、さらに、上体 3 の運動と床反力との関係も、上体 3 の並進運動（上体並進モード）と床反力との関係、上体 3 の傾斜運動（上体傾斜モード）と床反力との関係、上体 3 のヨー回転運動（上体ヨー回転モード）と床反力との関係、並びに両腕体 5、5 の逆位相腕振り運動（逆位相腕振りモード）と床反力との関係に分離される。具体的には、上体質点 3 m の水平運動によって発生する床反力は、上体 3 の水平方向並進運動（上体並進モード）によって発生する床反力に対応し、フライホイール  $F H_x$  および  $F H_y$  の回転運動によって発生する床反力は、上体 3 の傾斜角の回転運動（上体傾斜モード）によって発生する床反力に対応する。なお、フライホイール  $F H_x$  の回転運動は、上体 3 の傾斜角のロール方向（X 軸回り）の回転運動に対応し、フライホイール  $F H_y$  の回転運動は、上体 3 の傾斜角のピッチ方向（Y 軸回り）の回転運動に対応している。また、フライホイール  $F H_{bz}$  の回転運動によって発生する床反力は、上体 3 のヨー回転運動（上体ヨー回転モード）によって発生する床反力に対応する。また、フライホイール  $F H_{az}$  の回転運動によって発生する床反力は、逆位相腕振り（逆位相腕振りモード）によって発生する床反力に対応する。

尚、ロボット 1 の腕体の質量は上体 3 に含まれるものとし、上体質点 3 m は腕体 5、5 の質量を含む質量をもつ。

説明の便宜上、動力学モデルに関する変数およびパラメータを以下のように定義する。なお、各質点 2 m, 2 m, 3 m はそれに対応する部位の代表点であるか、あるいはその部位の位置姿勢から幾何学的に一義的に決定される点に相当する。例えば、支持脚側脚体 2 の質点 2 m の位置

5 は、該脚体 2 の足平 2 2 の底面の前記代表点から所定の距離だけ上方の点とする。

$Z_{sup}$  : 支持脚質点鉛直位置

$Z_{swg}$  : 遊脚質点鉛直位置

$Z_b$  : 上体質点鉛直位置 (上体鉛直位置とは一般的には異なる。)

10  $Z_{Gtotal}$  : 全体重心鉛直位置

$X_{sup}$  : 支持脚質点 X 位置

$Y_{sup}$  : 支持脚質点 Y 位置

$X_{swg}$  : 遊脚質点 X 位置

$Y_{swg}$  : 遊脚質点 Y 位置

15  $X_b$  : 上体質点 X 位置 (上体質点位置は、前記点  $P_r$  から上体の前後方向にある所定の距離だけオフセットした点である。オフセットは、直立時などにおいて、厳密モデルの重心位置と、本動力学モデルの重心位置がなるべく一致するように、決定される。上体水平位置とは一般的には異なる。)

20  $Y_b$  : 上体質点 Y 位置

$X_{Gtotal}$  : 全体重心水平 X 位置

$Y_{Gtotal}$  : 全体重心水平 Y 位置

$\theta_{bx}$  : 鉛直方向に対する X 軸回りの上体傾斜角

$\theta_{by}$  : 鉛直方向に対する Y 軸回りの上体傾斜角

25  $\theta_{bz}$  : 上体ヨ一回転角

$\theta_{az}$  : 逆位相腕振り角

mb : 上体質点質量

msup : 支持脚質点質量

mswg : 遊脚質点質量

mtotal : ロボット総質量 ( $= m_{total} + m_{sup} + m_{swg}$ )

- 5 J : 上体慣性モーメント (上体傾斜モードにおける等価慣性モーメントである。すなわち、 $FH_x$  および  $FH_y$  の慣性モーメントである。実ロボット1の上体3部位の慣性モーメントとは一般的には一致しない。)

Jbz : 鉛直軸まわり上体慣性モーメント (上体ヨー回転モードにおける等価慣性モーメントである。実ロボット1の上体3部位の慣性モーメントとは一般的には一致しない。)

- 10 Jaz : 腕振り鉛直軸まわり慣性モーメント (スピンキャンセルのための逆位相腕振りにおける等価慣性モーメントである。すなわち、 $FH_z$  の慣性モーメントである。)

Jaz : 腕振り鉛直軸まわり慣性モーメント (スピンキャンセルのための逆位相腕振りにおける等価慣性モーメントである。すなわち、 $FH_z$  の慣性モーメントである。)

Fx : 床反力X成分 (詳しくは並進床反力の前後方向 (X軸) 成分)

- 15 Fy : 床反力Y成分 (詳しくは並進床反力の左右方向 (Y軸) 成分)

Fz : 床反力鉛直成分 (詳しくは並進床反力の鉛直方向 (Z軸) 成分。)

本参考例では、これは目標並進床反力鉛直成分に等しい)

Mx : 目標ZMPまわりの床反力モーメントX成分 (詳しくは床反力モーメントの前後軸 (X軸) まわり成分)

- 20 My : 目標ZMPまわりの床反力モーメントY成分 (詳しくは床反力モーメントの左右軸 (Y軸) まわり成分)

Mz : 目標ZMPまわりの床反力モーメントZ成分 (詳しくは床反力モーメントの鉛直軸 (Z軸) まわり成分)

- 25 なお、各質点 2 m, 3 m の X 位置、Y 位置はそれぞれ前後方向 (X 軸方向) の位置、左右方向 (Y 軸方向) の位置を意味している。また、本参考例では、各脚体 2 の質点 2 m の位置と、その脚体 2 の足平 2 2 の位



置（足平22のあらかじめ定めた代表点の位置）との位置関係はあらかじめ定められており、一方の位置が決まれば、他方の位置は一義的に定まるものとされている。また、上体質点3mと、上体3の位置（上体3のあらかじめ定められた代表点の位置）との位置関係は、上体3の姿勢角（以降、上体に関しては、姿勢角とは、傾斜角とヨー角を意味するものとする。）に応じてあらかじめ定められており、一方の位置と姿勢角とが決まれば、他方の位置は一義的に定まるものとされている。

また、任意の変数Xに対して、 $dX/dt$ はXの1階微分を表わし、 $d^2X/dt^2$ はXの2階微分を表わす。したがって、変数Xが変位ならば、 $dX/dt$ は速度、 $d^2X/dt^2$ は加速度を意味する。gは重力加速度定数を示す。ここでは、gは正の値とする。

上記動力学モデルの運動方程式（動力学的平衡条件を表す式）は、式01、式02x、式02y、式03x、式03y、式03zで表される。

$$F_z = m_b * (g + d^2Z_b/dt^2) + m_{sup} * (g + d^2Z_{sup}/dt^2) + m_{swg} * (g + d^2Z_{swg}/dt^2) \quad \dots\dots \text{式01}$$

$$F_x = m_b * d^2X_b/dt^2 + m_{sup} * d^2X_{sup}/dt^2 + m_{swg} * d^2X_{swg}/dt^2 \quad \dots\dots \text{式02x}$$

$$F_y = m_b * d^2Y_b/dt^2 + m_{sup} * d^2Y_{sup}/dt^2 + m_{swg} * d^2Y_{swg}/dt^2 \quad \dots\dots \text{式02y}$$

$$\begin{aligned} M_x = & m_b * (Y_b - Y_{zmp}) * (g + d^2Z_b/dt^2) \\ & - m_b * (Z_b - Z_{zmp}) * (d^2Y_b/dt^2) \\ & + m_{sup} * (Y_{sup} - Y_{zmp}) * (g + d^2Z_{sup}/dt^2) \\ & - m_{sup} * (Z_{sup} - Z_{zmp}) * (d^2Y_{sup}/dt^2) \end{aligned}$$

6 2

$$\begin{aligned}
& + m_{\text{swg}} * (Y_{\text{swg}} - Y_{\text{zmp}}) * (g + d^2 Z_{\text{swg}} / dt^2) \\
& - m_{\text{swg}} * (Z_{\text{swg}} - Z_{\text{zmp}}) * (d^2 Y_{\text{swg}} / dt^2) + J * d^2 \theta_{\text{bx}} / dt^2 \\
& \dots\dots \text{式 } 0 \ 3 \ x
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
5 \quad M_y = & - m_b * (X_b - X_{\text{zmp}}) * (g + d^2 Z_b / dt^2) \\
& + m_b * (Z_b - Z_{\text{zmp}}) * (d^2 X_b / dt^2) \\
& - m_{\text{sup}} * (X_{\text{sup}} - X_{\text{zmp}}) * (g + d^2 Z_{\text{sup}} / dt^2) \\
& + m_{\text{sup}} * (Z_{\text{sup}} - Z_{\text{zmp}}) * (d^2 X_{\text{sup}} / dt^2) \\
& - m_{\text{swg}} * (X_{\text{swg}} - X_{\text{zmp}}) * (g + d^2 Z_{\text{swg}} / dt^2) \\
10 \quad & + m_{\text{swg}} * (Z_{\text{swg}} - Z_{\text{zmp}}) * (d^2 X_{\text{swg}} / dt^2) + J * d^2 \theta_{\text{by}} / dt^2 \\
& \dots\dots \text{式 } 0 \ 3 \ y
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_z = & m_b * (X_b - X_{\text{zmp}}) * (d^2 Y_b / dt^2) - m_b * (Y_b - Y_{\text{zmp}}) * (d^2 X_b / dt^2) \\
& + m_{\text{sup}} * (X_{\text{sup}} - X_{\text{zmp}}) * (d^2 Y_{\text{sup}} / dt^2) \\
15 \quad & - m_{\text{sup}} * (Y_{\text{sup}} - Y_{\text{zmp}}) * (d^2 X_{\text{sup}} / dt^2) \\
& + m_{\text{swg}} * (X_{\text{swg}} - X_{\text{zmp}}) * (d^2 Y_{\text{swg}} / dt^2) \\
& - m_{\text{swg}} * (Y_{\text{swg}} - Y_{\text{zmp}}) * (d^2 X_{\text{swg}} / dt^2) \\
& + J_{\text{bz}} * d^2 \theta_{\text{bz}} / dt^2 + J_{\text{az}} * d^2 \theta_{\text{az}} / dt^2 \\
& \dots\dots \text{式 } 0 \ 3 \ z
\end{aligned}$$

20

また、ロボット全体重心位置には次の関係式が成立する。

$$Z_{\text{Gtotal}} = (m_b * Z_b + m_{\text{sup}} * Z_{\text{sup}} + m_{\text{swg}} * Z_{\text{swg}}) / m_{\text{total}} \dots\dots \text{式 } 0 \ 4$$

$$X_{\text{Gtotal}} = (m_b * X_b + m_{\text{sup}} * X_{\text{sup}} + m_{\text{swg}} * X_{\text{swg}}) / m_{\text{total}} \dots\dots \text{式 } 0 \ 5 \ x$$

25

$$Y_{\text{Gtotal}} = (m_b * Y_b + m_{\text{sup}} * Y_{\text{sup}} + m_{\text{swg}} * Y_{\text{swg}}) / m_{\text{total}}$$

……式 0 5 y

以下に上記動力学モデルと前記  $\Delta F_p$ 、 $\Delta M_p$ 、 $\Delta F_r$ 、 $\Delta M_r$  の関係を示す。

- 5 前記  $\Delta F_p$  は、式 0 2 x または式 0 2 y において、 $d^2X_b/dt^2$  または  $d^2Y_b/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $F_x$  または  $F_y$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta F_p = m b \quad \dots \text{式 0 6}$$

- すなわち、上体並進モードの各水平軸（X 軸、Y 軸）方向の単位加速度  
10 当たりの床反力水平成分の変化  $\Delta F_p$  は、上記動力学モデルの上体質点 3 m の質量に相当する。

前記  $\Delta M_p$  は、式 0 3 y または式 0 3 x において、 $d^2X_b/dt^2$  または  $d^2Y_b/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $M_y$  または  $M_x$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$15 \quad \Delta M_p = m b * (Z_b - Z_{zmp}) \quad \dots \text{式 0 7}$$

- すなわち、上体並進モードの各水平軸（X 軸、Y 軸）方向の単位加速度  
当たりの床反力モーメント水平成分の変化  $\Delta M_p$  は、上記動力学モデル  
の上体質点質量に、上体質点 3 m の目標  $Z_{MP}$  からの高さ（鉛直位置）  
を乗じたものになる。このときの上体質点 3 m 及び目標  $Z_{MP}$  の位置と、  
20 上体質点 3 m の運動との関係は、上体質点 3 m を倒立振子質点、目標  $Z_{MP}$  を倒立振子支点に対応づけたときの倒立振子の挙動に相当する。なお、Y 軸方向の  $\Delta M_p$  は、より正確には、式 0 7 の右辺の符号を反転させたものである。

- 前記  $\Delta F_r$  は、式 0 2 x または式 0 2 y において、 $d^2\theta_{by}/dt^2$  を単位  
25 量だけ摂動させたときの  $F_x$  または  $F_y$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta F_r = 0 \quad \dots \text{式 } 08$$

すなわち、上体傾斜モードの各水平軸（X軸、Y軸）方向の単位加速度当たりの床反力水平成分の変化  $\Delta F_r$  は、0である。

前記  $\Delta M_r$  は、式 03x または式 03y において、 $d^2\theta_{bx}/dt^2$  または  
5  $d^2\theta_{by}/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $M_x$  または  $M_y$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta M_r = J \quad \dots \text{式 } 09$$

すなわち、上体傾斜モードの各水平軸（X軸、Y軸）方向の単位加速度当たりの床反力モーメント水平成分の変化  $\Delta M_r$  は、水平軸フライホイール（ $FH_x$  および  $FH_y$ ）の慣性モーメントに相当する。  
10

前記  $\Delta M_{bz}$  は、式 03z において、 $d^2\theta_{bz}/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $M_z$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta M_{bz} = J_{bz} \quad \dots \text{式 } 09b$$

すなわち、上体ヨー回転モードの単位加速度当たりの床反力モーメント成分の変化  $\Delta M_{bz}$  は、上体ヨー回転に対応するフライホイール  $FH_{bz}$   
15 の慣性モーメントに相当する。

前記  $\Delta M_{az}$  は、式 03z において、 $d^2\theta_{az}/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $M_z$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta M_{az} = J_{az} \quad \dots \text{式 } 09a$$

すなわち、逆位相腕振りの単位角加速度当たりの床反力モーメント成分の変化  $\Delta M_{az}$  は、腕振りに対応するフライホイール  $FH_{az}$  の慣性モーメントに相当する。  
20

本参考例における歩容生成装置 100 は、ロボット 1 の片方の脚体 2 が着地してから他方の脚体 2 が着地するまでの 1 歩分の目標歩容（前記  
25 狭義の意味での目標歩容）を単位として、その 1 歩分の目標歩容を順番に生成する。従って、本参考例で生成する図 5 の走行歩容では、該目標

歩容は片脚支持期の開始時から、これに続く空中期の終了時（次の片脚支持期の開始時）までの目標歩容が順番に生成される。ここで、新たに生成しようとしている目標歩容を「今回歩容」、その次の目標歩容を「次回歩容」、さらにその次の目標歩容を「次次回歩容」、というように  
5 呼ぶ。また、「今回歩容」の一つ前に生成した目標歩容を「前回歩容」と呼ぶ。

また、歩容生成装置 100 が今回歩容を新たに生成するとき、該歩容生成装置 100 には、ロボット 1 の 2 歩先までの遊脚側足平 22 の着地  
10 予 positioning 姿勢、着地予定時刻の要求値（要求）が歩容に対する要求パラメータとして入力される（あるいは歩容生成装置 100 が記憶装置から要求パラメータを読み込む）。そして、歩容生成装置 100 は、これらの要求パラメータを用いて、目標上体位置姿勢軌道、目標足平位置姿勢軌道、目標 ZMP 軌道、目標床反力鉛直成分軌道、目標腕姿勢軌道等を生成する。このとき、これらの軌道を規定する歩容パラメータの一部は、  
15 歩行の継続性を確保するように適宜修正される。

以下に図 5 の走行歩容を生成することを例にして、本参考例における歩容生成装置 100 の歩容生成処理の詳細を図 13～図 46 を参照しつつ説明する。図 13 は、その歩容生成装置 100 が実行する歩容生成処理のメインルーチンを示すフローチャート（構造化フローチャート）で  
20 ある。

まず S010 において時刻  $t$  を 0 に初期化するなど種々の初期化作業が行なわれる。この処理は、歩容生成装置 100 の起動時等に行なわれる。次いで、S012 を経て S014 に進み、歩容生成装置 100 は、制御周期（図 13 のフローチャートの演算処理周期）毎のタイマ割り込みを待つ。制御周期は  $\Delta t$  である。  
25

次いで、S016 に進み、歩容の切り替わり目であるか否かが判断さ

れ、歩容の切り替わり目であるときはS 0 1 8に進むと共に、切り替わり目でないときはS 0 3 0に進む。ここで、上記「歩容の切り替わり目」は、前回歩容の生成が完了し、今回歩容の生成を開始するタイミングを意味し、例えば前回歩容の生成を完了した制御周期の次の制御周期  
5 が歩容の切り替わり目になる。

S 0 1 8に進むときは時刻  $t$  が0に初期化され、次いでS 0 2 0に進み、次回歩容支持脚座標系、次次回歩容支持脚座標系、今回歩容周期および次回歩容周期が読み込まれる。これらの支持脚座標系及び歩容周期は、前記要求パラメータにより定まるものである。すなわち、本参考例  
10 では、歩容生成装置 1 0 0 にジョイスティック 7 3 等から与えられる要求パラメータは、2 歩先までの遊脚側足平 2 2 の着地予定位置姿勢（足平 2 2 が着地してから足底を床面にほぼ全面的に接触させるように、滑らずに回転させた状態での足平位置姿勢）、着地予定時刻の要求値を含んでおり、その1 歩目の要求値、2 歩目の要求値がそれぞれ、今回歩容、  
15 次回歩容に対応するものとして、今回歩容の生成開始時（前記S 0 1 6の歩容の切り替わり目）以前に歩容生成装置 1 0 0 に与えられたものである。なお、これらの要求値は今回歩容の生成途中でも変更することは可能である。

そして、上記要求パラメータにおける1 歩目の遊脚側足平 2 2（今回  
20 歩容での遊脚側足平 2 2）の着地予定位置姿勢の要求値に対応して次回歩容支持脚座標系が定まる。

例えば図 1 6 を参照して、今回歩容（1 歩目）に係わる遊脚側足平 2 2（図では2 2 L）の着地予定位置姿勢の要求値が、今回歩容の支持脚側足平 2 2（図では2 2 R）の着地位置姿勢に対して、今回歩容支持脚  
25 座標系のX 軸方向（今回歩容の支持脚側足平 2 2 Rの前後方向）及びY 軸方向（今回歩容の支持脚側足平 2 2 Rの左右方向）に、それぞれ

## 67

$x_{next}$ 、 $y_{next}$  だけ移動し、且つ Z 軸回り（鉛直軸回り）に  $\theta_{z_{next}}$  だけ回転させた位置姿勢であるとする。ここで、支持脚座標系は、支持脚側足平 22 を水平姿勢（より一般的には床面に平行な姿勢）にして該支持脚側足平 22 の底面のほぼ全面を床面に接触（密着）させた状態において、該支持脚側脚体 2 の足首中心から床面に延ばした垂線が該床面と交わる点（この点は、本参考例の例では支持脚側足平 22 の底面のほぼ全面を床面に接触させた状態では、該足平 22 の代表点と合致する）を原点とし、その原点を通る水平面を XY 平面とするグローバル座標系（床に固定された座標系）である。この場合、X 軸方向、Y 軸方向は、それぞれ支持脚側足平 22 の前後方向、左右方向である。尚、支持脚座標系の原点は、必ずしも支持脚側足平 22 の底面のほぼ全面を床面に接触させた状態での該足平 22 の代表点（足平 22 の位置を代表する点）に合致する必要はなく、該代表点と異なる床面上の点に設定されてもよい。

このとき、次回歩容支持脚座標系は、図示のように今回歩容の遊脚側足平 22 L の着地予定位置姿勢の要求値に従って該足平 22 を着地させた場合（足平 22 の代表点を着地予定位置の要求値に一致させ、且つ、足平 22 の姿勢（向き）を着地予定姿勢の要求値に一致させた場合）における該足平 22 L の代表点（より詳しくは該代表点に合致する床上の点）を原点とし、該原点を通る水平面内における該足平 22 L の前後方向、左右方向をそれぞれ X' 軸方向、Y' 軸方向とする座標系である。

上記と同様に、2 歩目の遊脚側足平 22 の着地予定位置姿勢の要求値に応じて次々回歩容支持脚座標系（図 16 の X'' Y'' 座標を参照）が定まる。また、今回歩容周期は、今回歩容の支持脚側足平 22 の着地予定時刻（要求値）から、1 歩目（今回歩容）の遊脚側足平 22 の着地予定時刻（要求値）までの時間として定まり、次回歩容周期は、1 歩目の遊

脚側足平 2 2 の着地予定時刻（要求値）から 2 歩目の遊脚側足平 2 2 の着地予定時刻（要求値）までの時間として定まる。

尚、前記要求パラメータは、本参考例ではジョイスティック 7 3 の所要の操作によって歩容生成装置 1 0 0 に入力されるものであるが、あらかじめ該要求パラメータあるいはこれに対応する上記の支持脚座標系の位置姿勢及び歩容周期をロボット 1 の移動スケジュールとして記憶しておいても良い。あるいは、ジョイスティック 7 3 などの操縦装置からの指令（要求）とそのときまでのロボットの 1 の移動履歴とを基に前記次回及び次次回歩容支持脚座標系、並びに今回及び次回歩容周期を決定しても良い。

次いで S 0 2 2 に進み、歩容生成装置 1 0 0 は、今回歩容に続く仮想的な周期的歩容としての定常旋回歩容の歩容パラメータを決定する。該歩容パラメータは、定常旋回歩容における目標足平位置姿勢軌道を規定する足平軌道パラメータ、基準とする上体姿勢軌道を規定する基準上体姿勢軌道パラメータ、基準とする腕姿勢軌道を規定する基準腕姿勢軌道パラメータ、目標 Z M P 軌道を規定する Z M P 軌道パラメータ、目標床反力鉛直成分軌道を規定する床反力鉛直成分軌道パラメータを含む。さらに、床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲を規定するパラメータも歩容パラメータに含まれる。

尚、この明細書で「定常旋回歩容」は、その歩容を繰り返したときに歩容の境界（本参考例では 1 歩毎の歩容の境界）においてロボット 1 の運動状態（足平位置姿勢、上体位置姿勢等の状態）に不連続が生じないような周期的歩容を意味するものとして使用する。以降、「定常旋回歩容」を「定常歩容」と略す場合もある。

周期的歩容である定常旋回歩容は、本参考例では、ロボット 1 の 2 歩分の歩容、すなわち今回歩容に続く第 1 旋回歩容と該第 1 旋回歩容に続く



く第2旋回歩容とからなる歩容を該定常旋回歩容の1周期分の歩容として、その1周期分の歩容を繰り返す歩容である。尚、ここで「旋回」なる用語を用いたのは、旋回率を零とするときは直進を意味するので、直進も広義の意味で旋回に含ませることができるからである。また、生成  
5 する目標歩容が前記図5の走行歩容であると、その目標歩容の今回歩容は、片脚支持期及び空中期を有する走行歩容であるので、定常旋回歩容の第1旋回歩容及び第2旋回歩容は、いずれも今回歩容と同様に片脚支持期と空中期とを有する歩容である。つまり、第1旋回歩容及び第2旋回歩容の基本的な歩容形態は今回歩容と同一である。

- 10 定常旋回歩容について補足すると、2足移動ロボットでは、定常旋回歩容の1周期分は、前記した狭義の意味での歩容が、少なくとも2歩分、必要である。そして、3歩以上の歩容を1周期分の歩容とする複雑な定常旋回歩容を設定することも可能である。但し、定常旋回歩容は、後述の如く、今回歩容の終端（終了時刻）における発散成分（詳細は後述す  
15 る）を決定するためだけに用いられる。このため、3歩以上の歩容を1周期とする定常旋回歩容を用いることは、歩容生成の処理が煩雑となるにも関わらず、効果は少ない。そこで、本参考例での定常旋回歩容の1周期分の歩容を2歩分の歩容（第1及び第2旋回歩容）により構成するようにしている。尚、3足以上の脚式移動ロボットにあっては、それに  
20 応じて定常旋回歩容を定義するに足る歩容数が増加する。以下では、説明の便宜上、複数の狭義の歩容（本参考例では2歩分の歩容）から成る定常旋回歩容を1歩の歩容とみなす。

- 定常旋回歩容は、歩容生成装置100で今回歩容の終端における発散成分や上体鉛直位置速度、上体姿勢角及びその角速度等のロボット1の  
25 運動状態を決定するために暫定的に作成されるものであり、歩容生成装置100からそのまま出力されるものではない。

尚、「発散」とは、図14に示すように、2足移動ロボット1の上体3の位置が両足平22, 22の位置からかけ離れた位置にずれてしまうことを意味する。発散成分の値とは、2足移動ロボット1の上体3の位置が両足平22, 22の位置（より具体的には、支持脚側足平22の接  
5 地面に設定されたグローバル座標系（支持脚座標系）の原点）からかけ離れていく具合を表す数値である。

本参考例では、目標歩容が、前記発散を生じることなく、継続的に生成されるように、発散成分を指標にして歩容を生成するようにした。ただし、継続的な歩容の代表例である定常歩容（歩容の軌道の不連続を発生することなく、同じパターンの歩容を繰り返すことができる周期的歩容であり、原理上、無限回繰り返しても発散しない歩容）の初期発散成分（定常歩容の初期時刻での発散成分）であっても、単純に0ではなく、定常歩容のパラメータが変われば、その初期発散成分も変わる。すなわち、歩き方あるいは走り方等の歩容形態によって、適切な発散成分が  
15 変わる。そこで、本参考例では、これから生成しようとする今回歩容の後に続く定常歩容が前記今回歩容に係わる要求パラメータに応じて設定され、定常歩容の初期発散成分を求めてから、今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させる（より一般的には、今回歩容を定常歩容に連続させもしくは近づける）ように、今回歩容を生成する。こ  
20 れのような歩容生成の基本的な指針は本出願人が先に提案したPCT公開公報 WO/02/40224 のものと同様である。

本発明の参考例では、PCT公開公報 WO/02/40224 の第1実施形態で用いたような線形な3質点動力学モデルを用いていないが、次式で定義される発散成分および収束成分の概念は、図12に示したモデルの  
25 ような非線形な動力学モデルの挙動の摂動分に対しても、近似的に十分な精度で適用することができる。

発散成分＝上体質点水平位置＋上体質点水平速度／ $\omega 0$

…式 1 0

収束成分＝上体質点水平位置－上体質点水平速度／ $\omega 0'$

…式 1 1

5

ただし、ここでの上体質点水平位置は、図 1 2 に示す前記動力学モデルにおいては、上体質点水平位置  $Xb$  を表す。

また、 $\omega 0$ 、 $\omega 0'$  はある所定の値である。これらの  $\omega 0$ 、 $\omega 0'$  値はほぼ同じ値であるが、厳密には一致しない。そして、走行時では、P C  
10 T 公開公報 WO／02／40224 の歩行歩容生成時の値に対して若干変更する必要がある。

発散成分および収束成分に関するその他の詳細は、P C T 公開公報 WO／02／40224 に記述されているので、ここではこれ以上言及しない。

本参考例においては、P C T 公開公報 WO／02／40224 に示した方式  
15 に加え、さらに、後述するように、目標床反力鉛直成分軌道を規定する歩容パラメータを設定し、この目標床反力鉛直成分を動学的に満足するようにロボット 1 の全体重心鉛直位置を決定する。この場合、床反力鉛直成分の 2 階積分値がロボット 1 の全体重心鉛直位置を規定するものになるので、目標床反力鉛直成分の設定が悪いと、ロボット 1 の全体重  
20 心鉛直位置もしくは上体鉛直位置が高くなり過ぎたり低くなり過ぎたりする。したがって、目標床反力鉛直成分の設定方法も重要な課題である。しかし、床反力鉛直成分と上体鉛直位置との関係は、Z M P と上体水平位置との関係に似ているので、上体水平位置速度を適切にするための目標 Z M P 決定手法の一部を、以下の本参考例に示すように、少し変更す  
25 るだけで、上体鉛直位置速度を適切にするための目標床反力鉛直成分の決定手法に適用することができる。

本題に戻り、S 0 2 2 では、図 1 5 に示すフローチャートに従って、以下の処理が行われる。

まず、S 1 0 0 において、今回歩容、第 1 旋回歩容、第 2 旋回歩容の順に足平位置姿勢軌道がつながるように、定常歩容の歩容パラメータのうちの足平軌道パラメータが決定される。以下に具体的な設定方法を図 1 6 を参照して説明する。尚、以降の説明では、支持脚側の脚体 2 の足平 2 2 を支持脚足平と称し、遊脚側の脚体 2 の足平 2 2 を遊脚足平を称する。また、歩容の「初期」、「終端」はそれぞれ歩容の開始時刻、終了時刻もしくはそれらの時刻における瞬時歩容を意味する。

- 10 足平軌道パラメータは、第 1 旋回歩容および第 2 旋回歩容の初期及び終端のそれぞれにおける支持脚足平及び遊脚足平のそれぞれの位置姿勢、各旋回歩容の歩容周期等から構成される。この足平軌道パラメータのうち、第 1 旋回歩容初期遊脚足平位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端支持脚足平位置姿勢とされる。この場合、走行歩容では、今回歩容終端における支持脚足平 2 2 は、空中に移動している。そして、今回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、今回歩容初期支持脚足平位置姿勢（＝前回歩容終端遊脚足平位置姿勢）から、前記要求パラメータにおける 2 歩目の遊脚側足平 2 2 の着地予 positioning 姿勢の要求値（今回歩容の支持脚足平 2 2 の次回歩容における着地予 positioning 姿勢の要求値）もしくは該要求値に対応する次次回歩容支持脚座標系に応じて定まる次回歩容終端遊脚足平位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道（詳しくは次回歩容支持脚座標系から見た軌道）を、今回歩容終端まで前記有限時間整定フィルタを用いて生成することにより求められる。
- 15
- 20

- 尚、次回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、その位置姿勢から足平 2 2 を接地させたまま、つま先を下げるように該足平 2 2 を水平姿勢までピッチ方向に所定角度回転させたときの該足平の位置姿勢が次次回歩容支持
- 25

脚座標系の位置姿勢に合致するように決定される。換言すれば、次回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、前記要求パラメータにおける2歩目の遊脚側足平22の着地位置姿勢の要求値から、該足平22をすべらないように接地させたまま、つま先を持ち上げるように該足平22をピッチ方向に所定角度回転させた状態（つま先を上げてかかとを着地させた状態）での該足平22の位置姿勢である。

また、第1巡回歩容初期支持脚足平位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端遊脚足平位置姿勢とされる。この場合、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、前記次回歩容終端遊脚足平位置姿勢の場合と同様、前記次回歩容支持脚座標系もしくはこれに対応する前記要求パラメータの1歩目（今回歩容）の遊脚着地予定位置姿勢の要求値に応じて定まるものである。すなわち、該今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、その位置姿勢から、足平22を接地させたまま、つま先を下げるように該足平22を回転させて該足平22の底面のほぼ全面を床面に接地させたときの該足平の代表点が次回歩容支持脚座標系の原点に合致するように決定される。

第1巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢や次回歩容終端遊脚足平位置姿勢の決定手法と同様に、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢に基づいて決定される。より具体的には、第1巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、その位置姿勢から足平22を接地させたまま、すべらないように該足平22を水平姿勢まで所定角度回転させたときの足平位置姿勢が、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢に合致するように設定される。

第1巡回歩容終端では、支持脚足平22は離床して空中にある。支持脚足平22が離床してから後の軌道を決定するために、第1巡回歩容支

持脚足平着地予定位置姿勢が設定される。第1巡回歩容支持脚足平着地  
予定位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た次次次回歩容支持脚座  
標系の位置姿勢に基づいて設定される。より具体的には、第1巡回歩容  
支持脚足平着地予定位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た次次次  
5 回歩容支持脚座標系の位置姿勢である。なお、次次次回歩容支持脚座標  
系は、次次回歩容支持脚座標系と次次次回歩容支持脚座標系との相対的  
位置姿勢関係が、今回歩容支持脚座標系と次回歩容支持脚座標系との相  
対的位置姿勢関係と一致するように設定される。

第1巡回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、第1巡回歩容初期支持脚足  
10 平位置姿勢を求めた場合と同様に、第1巡回歩容初期支持脚足平位置姿  
勢から、前記第1巡回歩容支持脚足平着地予定位置姿勢に至る足平位置  
姿勢軌道（より詳しくは次回歩容支持脚座標系から見た軌道）を、第1  
巡回歩容終端まで前記有限時間整定フィルタを用いて生成することによ  
り求められる。

15 第2巡回歩容初期遊脚足平位置姿勢は、次次回歩容支持脚座標系から  
見た第1巡回歩容終端支持脚足平位置姿勢とされる。第2巡回歩容初期  
支持脚足平位置姿勢は、次次回歩容支持脚座標系から見た第1巡回歩容  
終端遊脚足平位置姿勢とされる。

第2巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩容支持脚座標系から見  
20 た今回歩容終端遊脚足平位置姿勢とされる。第2巡回歩容終端支持脚足  
平位置姿勢は、今回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端支持脚足平  
位置姿勢とされる。

第1巡回歩容および第2巡回歩容の歩容周期は、次回歩容周期と同一  
に設定される。これらの第1巡回歩容及び第2巡回歩容の歩容周期は、  
25 互いに同一にすることは必ずしも必要ではないが、いずれの周期も、少  
なくとも次回歩容周期に応じて決定するのが好ましい。尚、今回歩容、

第1 旋回歩容および第2 旋回歩容の上記以外の運動パラメータ（両脚支持期時間などの時間パラメータを含む）は、上記決定されたパラメータに応じて、歩容の条件（アクチュエータの速度が許容範囲に入っているか、可動角を超えていないか、床などと干渉していないかなど）を満足するように適宜決定する。

次に、S 1 0 2 に進み、目標上体姿勢が追従すべき基準上体姿勢軌道を規定する基準上体姿勢軌道パラメータが決定される。基準上体姿勢は、定常歩容の初期（第1 旋回歩容の初期）と終端（第2 旋回歩容の終端）とでつながるように（定常歩容の初期、終端での基準上体姿勢の姿勢角及びその角速度が一致するように）に設定されている限り、一定姿勢である必要はないが、本参考例では理解を容易にするため、基準上体姿勢のうちの傾斜角（鉛直方向に対する傾斜角）に係わる姿勢は、直立姿勢（鉛直姿勢）に設定される。つまり、本参考例では、上体3 の傾斜角に関する基準上体姿勢は、定常歩容の全期間において直立姿勢に設定される。従って、本参考例では、基準上体姿勢のうちの傾斜角の角速度及び角加速度は0 である。基準上体姿勢のうちのヨー角軌道（以降、基準ヨー角軌道とも呼ぶ） $\theta_{bz}$  は、例えば一定角速度（定常歩容の平均旋回速度）の運動にすれば良い。あるいは、後述の基準逆位相腕振り軌道の例（図1 8）のようにサイン波状にしても良い。ただし、定常歩容を繰り返した時に基準ヨー角およびその角速度が連続となるように設定する。

尚、本参考例では、目標上体姿勢のうちのヨー角軌道（以降、目標ヨー角軌道とも呼ぶ）は、基準ヨー角軌道に一致させるものとする。

次に、S 1 0 4 に進み、基準腕姿勢軌道パラメータが決定される。具体的には、両腕体5, 5 の全体の重心位置（上体3 に対する相対的な重心位置）、左右の手先（両腕体5, 5 の先端）の左右方向の間隔、および逆位相腕振り角に関するパラメータが決定される。基準逆位相腕振り

角は、たとえば図17のように左旋回する場合には、図18のように設定すれば良い。図18のように、基準逆位相腕振り角  $\theta_{azref}$  は、定常歩容を繰り返した時に歩容の境界（第2旋回歩容の終端と次の第1旋回歩容の境界）において逆位相腕振り角および角速度が共に連続になり、

5    かつ第1旋回歩容初期における支持脚と逆位相腕振り角の相対関係が、次の第1旋回歩容初期における支持脚と逆位相腕振り角の相対関係に一致するように設定される。すなわち、第1旋回歩容の初期逆位相腕振り角速度と第2旋回歩容の終端逆位相腕振り角速度が一致し、第2旋回歩容の終端逆位相腕振り角は、定常歩容の旋回角（第1旋回歩容と第2旋回歩容の旋回角の和）に第1旋回歩容初期逆位相腕振り角を加えた値に

10    設定される。図18では基準逆位相腕振り角  $\theta_{azref}$  をサイン波状の波形としたが、一定角速度に設定しても良い。あるいは、支持脚のヨー角と遊脚のヨー角の平均の値としても良い。

尚、本参考例では、目標腕姿勢の両腕体5，5の全体の重心位置（上

15    体3に対する相対位置）は、上体3に対して一定に維持されるように設定される。

次に、S106に進み、床反力鉛直成分軌道パラメータが設定される。この場合、該パラメータにより規定される床反力鉛直成分軌道が、第1旋回歩容および第2旋回歩容のいずれにおいても図6のように実質的に

20    連続な（値がステップ状に飛ばない）ものとなるように床反力鉛直成分軌道パラメータが設定される。すなわち、定常旋回歩容の目標床反力鉛直成分軌道は図19のようなパターンで設定される。そのパターンでは、第1旋回歩容及び第2旋回歩容のいずれにおいても、片脚支持期では床反力鉛直成分が台形状に変化し、空中期では床反力鉛直成分が0に維持

25    される。そして、このパターンの折れ点の時刻や、台形部分の高さ（ピーク値）が床反力鉛直成分軌道パラメータとして設定される。



この床反力鉛直成分軌道パラメータの設定に際しては、床反力鉛直成分の歩容全期間（第1旋回歩容と第2旋回歩容両方の期間を合わせた期間で定常歩容の1周期の期間）における平均値をロボット1の自重と一致させる。すなわち、床反力鉛直成分の平均値がロボット1に作用する  
5 重力と同じ大きさで反対向きになるようにする。

上記のごとく床反力鉛直成分軌道を設定することは、定常歩容の条件を満たすために必要である。定常歩容の条件とは、支持脚座標系（支持脚側足平22の接地面に設定された座標系）から見た歩容のあらゆる状態変数（ロボット1の各部の位置、姿勢、速度等）の初期状態（第1旋  
10 回歩容の初期状態）と次の支持脚座標系（次の第1旋回歩容の支持脚座標系）から見た歩容の終端状態（第2旋回歩容の終端状態）が一致していることである（以下、この条件を定常歩容の境界条件ということがある）。したがって、定常歩容終端におけるロボット1の全体重心鉛直速度と定常歩容初期における全体重心鉛直速度との差（詳細には、第2旋  
15 回歩容終端の全体重心鉛直速度と第1旋回歩容初期の全体重心鉛直速度との差）も零でなければならない。上記差は床反力鉛直成分と重力との差の積分値（1階積分値）であるから、上記差を零にするためには、上記のごとく床反力鉛直成分軌道を設定する必要がある。

尚、本参考例では、床反力鉛直成分の第1旋回歩容、第2旋回歩容そ  
20 れぞれの期間における平均値をロボット1の自重と一致させるようにした。より具体的には、例えば第1旋回歩容及び第2旋回歩容の歩容周期に応じて各旋回歩容における床反力鉛直成分軌道の台形部分の折れ点の時刻を設定した上で、その台形部分の高さを、床反力鉛直成分の第1旋回歩容、第2旋回歩容それぞれの期間における平均値がロボット1の自  
25 重と一致するように決定した（台形の高さを未知数として、上記平均値及び自重の一致条件を表す方程式を解くことで台形の高さを求める）。

こうすることにより、第1旋回歩容終端の全体重心鉛直速度と第1旋回歩容初期の全体重心鉛直速度との差も0、第2旋回歩容終端の全体重心鉛直速度と第2旋回歩容初期の全体重心鉛直速度との差も0になる。

ただし、このようにする必然性はない。例えば、第1旋回歩容と第2旋回歩容との境界あたりで上体鉛直位置が高くなり過ぎたり低くなり過ぎたりして無理な姿勢になりそうな場合には、各旋回歩容で上記平均値及び自重を一致させた状態から各旋回歩容の床反力鉛直成分軌道の台形の高さ等を修正するようにしてもよい。

次に、S108に進み、上記のごとく図19のように設定された床反力鉛直成分軌道に応じて、床反力水平成分の許容範囲[Fxmin, Fxmax]（より詳しくはこれを規定するパラメータ）が図20のように設定される。図20の負側の折れ線が床反力水平成分許容下限値 Fxmin、正側の折れ線が床反力水平成分許容上限値 Fxmax を表す。これらの設定方法に関して以下に補足する。以下では、床面が水平である場合について説明する。

床反力水平成分は、床と足平22との間の摩擦によって発生するが、摩擦はいくらでも発生できるわけではなく、限界がある。したがって、生成された目標歩容に従って実際のロボット1が移動した時にスリップしないようにするためには、目標歩容の床反力水平成分が、常に摩擦限界以内にななければならない。そこで、この条件を満足させるために、床反力水平成分許容範囲を設定し、後述するように、目標歩容の床反力水平成分がこの許容範囲内になるように、目標歩容を生成することとした。

床と足平22との間の摩擦係数を $\mu$ とすると、Fxmin は、常に $-\mu$  \* 床反力鉛直成分以上に、Fxmax は $\mu$  \* 床反力鉛直成分以下に設定されなければならない。最も単純な設定方法は、次式による設定である。ただし、ka は1より小さい正の定数である。

$F_{xmin} = -k_a * \mu * \text{床反力鉛直成分}$

$F_{xmax} = k_a * \mu * \text{床反力鉛直成分}$

…式 1 2

図 2 0 の床反力水平成分許容範囲は、式 1 2 にしたがって設定した例  
5 である。床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータとして、図 2 0  
の台形波形などの折れ点での値と時刻を設定してもよいが、式 1 2 によ  
り床反力水平成分許容範囲を決定するときには、単に式 1 2 における  
( $k_a * \mu$ ) の値をパラメータとして設定するだけでも良い。

尚、上記条件（目標歩容の床反力水平成分を常に摩擦限界以内にする  
10 という条件）を満足しているならば、他の設定方法で床反力水平成分許  
容範囲を設定するようにしても構わない。

次に、S 1 0 9 に進み、上記のごとく図 1 9 のように設定された床反  
力鉛直成分軌道などに応じて、床反力モーメント鉛直成分の許容範囲  
[ $M_{zmin}$ ,  $M_{zmax}$ ]（より詳しくはこれを規定するパラメータ）が図 2  
15 1 のように設定される。図 2 1 の負側の折れ線が床反力モーメント鉛直  
成分許容下限値  $M_{zmin}$ 、正側の折れ線が床反力モーメント鉛直成分許  
容上限値  $M_{zmax}$  を表す。これらの設定方法に関して以下に補足する。  
以下では、床面が水平である場合について説明する。

床反力モーメント鉛直成分は、床と足平 2 2 との間の摩擦によって発  
20 生するが、摩擦はいくらでも発生できるわけではなく、限界がある。し  
たがって、生成された目標歩容に従って実際のロボット 1 が移動した時  
にスピンしないようにするためには、目標歩容の床反力モーメント鉛直  
成分が、常に摩擦限界以内になければならない。そこで、この条件を満  
足させるために、床反力モーメント鉛直成分許容範囲を設定し、後述す  
25 るように、目標歩容の床反力モーメント鉛直成分がこの許容範囲内にな  
るように、目標歩容を生成することとした。

床と足平 2 2 との間の摩擦係数を  $\mu$ 、モーメント鉛直成分を発生するための床と足平 2 2 との間の接触面の有効半径（あるいは床と足平 2 2 との間の接触面の目標 Z M P まわりの断面 2 次モーメントの平方根）を  $r$  とすると、 $M_{zmin}$  は、常に  $-\mu * r * \text{床反力鉛直成分}$  以上に、

- 5  $M_{zmax}$  は  $\mu * r * \text{床反力鉛直成分}$  以下に設定されなければならない。最も単純な設定方法は、次式による設定である。ただし、 $k_a$  は 1 より小さい正の定数である。

$$M_{zxmin} = -k_a * \mu * r * \text{床反力鉛直成分}$$

$$M_{zmax} = k_a * \mu * r * \text{床反力鉛直成分}$$

10

…式 1 0 1 2

- 図 2 1 の床反力モーメント鉛直成分許容範囲は、式 1 0 1 2 にしたがって設定した例である。床反力モーメント鉛直成分許容範囲を規定するパラメータとして、図 2 1 の台形波形などの折れ点での値と時刻を設定してもよいが、式 1 0 1 2 により床反力モーメント鉛直成分許容範囲を  
15 決定するときには、単に式 1 0 1 2 における  $(k_a * \mu)$  の値をパラメータとして設定するだけでも良い。  $r$  は、各瞬間において目標 Z M P と接地面から算出するのが良いが、定数としても構わない。

- 尚、上記条件（目標歩容の床反力モーメント鉛直成分を常に摩擦限界以内にするという条件）を満足しているならば、他の設定方法で床反力  
20 モーメント鉛直成分許容範囲を設定するようにしても構わない。

- さらには、床反力水平成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分許容範囲を独立に設定するのではなく、床反力水平成分と床反力鉛直成分モーメントの組み合わせの許容範囲を設定するようにしても良い。なぜなら、床反力水平成分が大きくなると、床反力モーメント鉛直成分の許容  
25 範囲が狭くなり、また、床反力モーメント鉛直成分が大きくなると、床反力水平成分の許容範囲が狭くなるからである。

次に、S 1 1 0に進み、第1旋回歩容および第2旋回歩容を合わせた定常歩容のZMP軌道を規定するZMP軌道パラメータが設定される。この場合、目標ZMP軌道は、前述したように安定余裕が高くかつ急激な変化をしないように設定される。

- 5 さらに詳細には、図5の走行歩容においては、支持脚足平22のかかとで着地した後、しばらくして該支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地し、さらにしばらくして、支持脚足平22のつま先だけが接地する。そして、次に支持脚足平22のつま先で蹴って空中に飛び上がり、最後に遊脚足平22のかかとで着地する。また、目標ZMPは接地面内に存在しなければならぬ。そこで、本参考例では、定常歩容の第1旋回歩容及び第2旋回歩容のそれぞれの目標ZMPのX軸方向の位置は、前記図7の上段図に示したように、支持脚足平22のかかとを初期位置として、該足平22の底面のほぼ全体が接地するまでその位置に留まるように設定される。次に、目標ZMPは支持脚足平22の中央に移動し、該
- 10 足平22がつま先接地状態になるまでにつま先に移動し、その後、離床時まで支持脚足平22のつま先から遊脚足平22のかかとの着地位置まで連続的に移動するように設定される。したがって、第1旋回歩容と第2旋回歩容とから成る定常歩容の目標ZMP軌道（X軸方向の軌道）は、図22のようになる。そして、この目標ZMP軌道の折れ点の時刻及び位置がZMP軌道パラメータとして設定される。この場合、折れ点の時刻は、前記要求パラメータに応じて定めた第1旋回歩容及び第2旋回歩容の歩容周期に応じて設定され、該折れ点の位置は、次回歩容支持脚座標系及び次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢あるいはこれらの座標系を規定する要求パラメータの1歩目及び2歩目の遊脚側足平着
- 15
- 20
- 25

地予定位位置姿勢の要求値に応じて設定される。尚、ZMP軌道のY軸方向の位置は、前記図7の下段図に示したものと同様に設定される。より詳しくは、第1旋回歩容における目標ZMPのY軸方向位置の軌道は、図7の下段図のものと同一パターンで設定され、第2旋回歩容における目標ZMPのY軸方向位置の軌道は、第1旋回歩容のものと同じ形の軌道で、該軌道の終端につながるものに設定される。

次に、S112に進み、定常歩容1歩（1周期）の初期時刻、終端時刻、期間が以下のように再定義される。

- 定常歩容は、その初期と終端での状態変数が連続的につながる歩容でなければならない。このような歩容の決定を容易にするために、本参考例では、定常歩容を決定するまでは、前述の狭義の歩容の定義とは異なり、定常歩容の1歩の初期、終端、期間を便宜上、図19のように定める。すなわち、第1旋回歩容の片脚支持期の後半において床反力鉛直成分がある程度減少した時刻を定常歩容の初期時刻  $T_s$  として設定する。
- なお、初期時刻  $T_s$  は、図7に示すように、支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地した状態からつま先接地に変わる瞬間あるいはその直前の時刻（図7の足底全面接地期間の終了時刻もしくはその直前の時刻）に設定するのが望ましい。また、S110において設定した図22（または図7）に示す目標ZMPと時刻  $T_s$  との関係を説明すると、第1旋回歩容において支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地した後に、目標ZMPが支持脚足平22の中央に移動し、つま先接地状態になるまでにつま先に移動を完了した瞬間が、時刻  $T_s$  となっているのが望ましい。このような初期時刻  $T_s$  は例えば先に設定した目標ZMP軌道パラメータに応じて設定される。上記のごとく初期時刻  $T_s$  を設定する理由は後述する。

また、図19に示すように、定常歩容の周期  $T_{cyc}$  は第1旋回歩容と

第2旋回歩容の歩容周期の和である。定常歩容の終端時刻を  $T_e$  とする。 $T_e$  は、 $T_s$  に  $T_{cyc}$  を加えた時刻に設定される。

定常歩容が決定された時点（後述の図23のS204のループを抜けた時点）から、改めて、歩容の初期、終端等の定義を、前述の狭義の歩容の定義に戻すこととする。以下の説明では、前述の狭義の歩容の定義による初期時刻（支持脚側足平22の着地当初の時刻）を0とし、定常歩容を決定するまで用いる上記初期時刻  $T_s$  を参照符号  $T_s$  を用いて（単に「 $T_s$ 」と省略することもある）本来の初期時刻0と区別する。

最後にS114に進み、定常歩容の上体姿勢角・逆位相腕振り角復元期間 $[T_m, T_{s2}]$ および $[T_{m2}, T_e]$ を設定する。補足すると、定常歩容を繰り返した時に歩容の境界において上体姿勢角および逆位相腕振り角は連続であるべきである。そのためには、定常歩容の初期上体姿勢角速度と終端上体姿勢角速度が一致し、定常歩容の初期逆位相腕振り角速度と終端逆位相腕振り角速度が一致しなければならない。前記期間は、そのようにするための、上体姿勢角軌道と逆位相腕振り角軌道を調整する期間である。

具体的には、初期時刻  $T_s$  から第1旋回歩容の空中期を経て第2旋回歩容になり、床反力鉛直成分がある所定の大きさまで増加した時刻  $T_m$  が設定される。さらに、第2旋回歩容の片脚支持期の後半において床反力鉛直成分がある程度減少した時刻  $T_{s2}$  が設定される。さらに、第2旋回歩容の空中期を経て第1旋回歩容になり、床反力鉛直成分がある所定の大きさまで増加した時刻  $T_{m2}$  が設定される。

図19にこれらの時刻を示す。時刻  $T_m$  は、支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地した瞬間あるいはその直後に設定するのが望ましい。時刻  $T_{m2}$  も同様である。また、時刻  $T_{s2}$  は、前記初期時刻  $T_s$  同様、足平22の底面のほぼ全面が接地した状態からつま先接地に変わる瞬間あ

るいはその直前に設定するのが望ましい。

また、前記図 1 5 の S 1 1 0 において設定した図 2 2 の目標 Z M P とこれらの時刻  $T_m$ ,  $T_{s2}$ ,  $T_{m2}$  との関係を説明すると、第 2 旋回歩容において、目標 Z M P が、支持脚足平 2 2 のかかとを初期位置として、該足平 2 2 の底面のほぼ全体が接地するまでその位置に留まり、次に支持脚足平 2 2 の中央に移動し始める瞬間を時刻  $T_m$  とすることが望ましい。その後、支持脚足平 2 2 のつま先だけ接地した状態になるまでに、目標 Z M P がつま先に移動を完了した瞬間を、時刻  $T_{s2}$  とすることが望ましい。さらに次の第 1 旋回歩容において、目標 Z M P が、支持脚足平 2 2 のかかとを初期位置として該足平 2 2 の底面のほぼ全体が接地するまでその位置に留まり、次に支持脚足平 2 2 の中央に移動し始める瞬間を時刻  $T_{m2}$  とすることが望ましい。

上記のごとく設定する理由は後述する。尚、上体姿勢角を復元（調整）する期間と逆位相腕振り角を復元（調整）する期間を別々に設定しても良い。

図 1 3 の S 0 1 0 から S 0 2 2 までに示す処理が行われた後、S 0 2 4 に進み、定常歩容の初期状態が算出される。ここで算出される初期状態は、定常歩容の初期上体水平位置速度（水平方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期上体鉛直位置速度（鉛直方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期発散成分、初期上体姿勢角、角速度、および初期逆位相腕振り角、角速度である。この初期状態の算出は、図 2 3 のフローチャートに従って、探索的に行なわれる。

図 2 3 のフローチャートにおいては、先ず、S 2 0 0 において、定常歩容の歩容パラメータ（前記図 1 3 の S 0 2 2 で設定したパラメータ）に基づいて、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢、および目標上体姿勢角（傾斜角とヨー角）の初期状態（初期時刻  $T_s$  での状態）が決定される。



ここで状態とは、位置や姿勢角とその変化率（時間微分）とを表す。

この場合、支持脚側の目標足平位置姿勢の初期状態は、前記図15のS100で決定した足平軌道パラメータの第1巡回歩容初期支持脚足平位置姿勢から、第2巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道（次回歩容支持脚座標系から見た軌道）を時刻  $T_s$  まで有限時間整定フィルタにより生成することにより決定される。遊脚側の目標足平位置姿勢の初期状態は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容初期支持脚足平位置姿勢から、第1巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道を時刻  $T_s$  まで有限時間整定フィルタにより生成することにより決定される。また、目標腕姿勢の初期状態は、図15のS104で決定した基準腕姿勢軌道パラメータに基づいて求められる時刻  $T_s$  における基準腕姿勢に決定される。より具体的には、目標腕姿勢の両腕体5, 5の全体重心位置（上体3に対する相対位置）、左右の手先（両腕体5, 5の先端部）の左右方向の間隔および逆位相腕振り角・角速度が決定される。但し、逆位相腕振り角・角速度は、後述するように、定常歩容を繰り返した時に歩容の境界で連続するように修正されるので、ここではまだ仮に決定されただけである。

また、目標上体姿勢角の初期状態は、図15のS102で決定した基準上体姿勢軌道パラメータにより定まる時刻  $T_s$  における基準上体姿勢（傾斜角およびヨー角）及びその角速度が該目標上体姿勢角の初期状態として決定される。なお、本参考例では、上体3の傾斜角に係る基準上体姿勢は鉛直姿勢であるので、目標上体姿勢のうちの傾斜角の初期状態（傾斜角及びその角速度）は0である。

また、本参考例では、定常歩容の目標足平位置姿勢軌道、床反力鉛直成分軌道、及び目標ZMP軌道は、それぞれ、図15のフローチャートで決定した足平軌道パラメータ、床反力鉛直成分軌道パラメータ、ZM

P軌道パラメータにより互いに独立的に決定される。例えば定常歩容の瞬時瞬時の目標足平位置姿勢は、床反力鉛直成分の瞬時値に依存することなく足平軌道パラメータに応じて決定される。

次いでS 2 0 2において初期上体水平位置速度の候補（すなわち初期  
5 時刻  $T_s$  での上体水平位置速度候補）である（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）（ $X_s$ : 水平位置、 $V_{xs}$ : 水平速度）が仮決めされる。ここで仮決めする候補（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）は、任意でよいが、例えば前回歩容の生成時に求めた定常歩容の初期状態における上体水平位置速度を仮決め候補（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）とすればよい。

10 尚、説明を簡略にするため、サジタルプレーン上でX方向（前後方向）での定常歩容の初期状態を探索する場合を例にとるが、実際には位置・速度ともX方向（前後方向）、Y方向（左右方向）を別々にあるいは同時に定常歩容の初期状態（定常歩容の前記境界条件を満たす初期状態）を探索する必要がある。

15 補足すると、サジタルプレーン上では、ヨー回転やモーメント鉛直成分など鉛直軸まわりに関する概念は存在しないので、少なくともヨー回転やモーメント鉛直成分に関しては、3次元空間で演算される。

探索的な決定手法としては、擬似ヤコビアン（感度マトリックス）を求め、最急降下法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス  
20 法などを用いれば良い。本実施例では、最急降下法を用いる。

次いで、S 2 0 4を経てS 2 0 6において、定常歩容を繰り返した時に上体鉛直位置速度が連続になり、かつ、膝等の関節角が伸び過ぎたり縮み過ぎたりしないように、初期（時刻  $T_s$ ）上体鉛直位置速度（ $Z_s$ ,  $V_{zs}$ ）（ $Z_s$ : 鉛直位置、 $V_{zs}$ : 鉛直速度）が、決定される。これについて  
25 の詳細は、例えば本願出願人が先に出願したPCT/JP02/13592に記載されているので、ここでは省略する。

- S 2 0 6 の処理の後、次いで S 2 0 8 に進み、定常旋回歩容が仮に生成される（この仮生成される定常旋回歩容を以降、仮歩容ということがある）。より具体的には、前記図 1 3 の S 0 2 2 で決定した定常歩容の歩容パラメータを基に、初期時刻  $T_s$  から終端時刻  $T_e$  までの各瞬間に
- 5 おける目標 ZMP、目標床反力鉛直成分、目標足平位置姿勢、基準上体姿勢、目標腕姿勢、床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲が逐次求められる。そして、求めた目標 ZMP と目標床反力鉛直成分とに関する動力学的平衡条件、並びに床反力水平成分許容範囲の条件を満足するように、前記動力学モデル（図 1 2 のモデル）を
- 10 用いて、前記上体水平位置速度（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）、上体鉛直位置速度（ $Z_s$ ,  $V_{zs}$ ）を上体 3 の初期（時刻  $T_s$ ）状態として、上体位置姿勢を逐次決定することによって、時刻  $T_s$  から終端時刻  $T_e$  までの歩容を生成する。また、この時、上体姿勢は、基準上体姿勢になるべく一致するように生成される。
- 15 また、床反力モーメント鉛直成分に関する条件、すなわち、床反力モーメント鉛直成分許容範囲を満足するように、逆位相腕振り動作が決定される。

尚、この定常歩容の歩容生成は歩容生成装置 1 0 0 の内部で行われるだけであって、実際のロボット 1 を駆動するための目標値として、後述

20 する複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に出力されることはない。

以下に、S 2 0 8 の処理である逐次演算による定常歩容生成処理の詳細を説明する。

図 2 4 はその処理を示すサブルーチンフローチャートである。

以下説明すると、S 3 0 0 において、諸々の初期化が行われる。具体的には、仮歩容生成用時刻  $k$  に初期時刻  $T_s$  を代入する。さらに、上体

25 水平位置速度に、現在仮決定されている（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）（図 2 3 の S 2

02もしくは後述のS216もしくはS218で決定されたもの)が代入され、上体鉛直位置速度に、前記S206で求めた最新の( $Z_s$ ,  $V_{zs}$ )が代入される。また、上体姿勢角には、基準上体姿勢角初期値(初期時刻  $T_s$  での角度)が代入され、上体姿勢角速度には、基準上体  
5 上体姿勢角速度初期値(初期時刻  $T_s$  での角速度)が代入される。

逆位相腕振り角には、基準初期逆位相腕振り角(初期時刻  $T_s$  での角度)逆位相腕振り角速度には、基準初期逆位相腕振り角速度(初期時刻  $T_s$  での角速度)が代入される。

次いで、S302を経てS304において、仮歩容生成用時刻  $k$  が  
10 歩容終端時刻以前であるか否か( $k \leq T_s + T_{cyc}$  であるか否か)が判断され、その判断結果がYESである場合には、S306の歩容瞬時値決定サブルーチンに進み、歩容瞬時値が決定される。次いで歩容生成装置100の処理は、S308に進み、仮歩容生成用時刻  $k$  を $\Delta k$ だけ増やした後、S304に戻る。

15 ここで、 $\Delta k$  は、仮歩容生成のインターバルであり、通常、制御周期 $\Delta t$ と一致させておけば良い。なお、 $\Delta k$  は、仮歩容の動力学的精度を落としても良いならば、演算量を低減するために、 $\Delta k$  を $\Delta t$ よりも長く設定しても良い。

S304の判断結果がNOである場合には、S310に進む。以上の  
20 処理により、S310に進むまでに定常歩容(仮歩容)が初期から終端まで生成される。

以下に、S306の歩容瞬時値決定サブルーチンの詳細を図25を参照して説明する。

まず図25のS400において、定常歩容パラメータ(床反力鉛直成分軌道パラメータ)を基に、前記図19に示した目標床反力鉛直成分の  
25 時刻  $k$  における値(今回値)が求められる。さらに、S402におい

て、定常歩容パラメータ（ZMP軌道パラメータ）を基に、前記図22に示した目標ZMP軌道の時刻 $k$ における値（今回値）が求められる。

次いでS404に進み、定常歩容パラメータ（足平軌道パラメータ、基準上体姿勢軌道パラメータ、及び腕姿勢軌道パラメータ）を基に、時刻 $k$ における目標両足平位置姿勢（支持脚側及び遊脚側の両者の目標足平位置姿勢）、基準上体姿勢および基準腕姿勢の値（今回値）が求められる。基準腕姿勢に関しては、具体的には、両腕体5, 5の全体重心位置（上体3に対する相対位置）、左右の手先（両腕体5, 5の先端部）の左右方向の間隔および逆位相腕振り角の値（今回値）が求められる。

尚、目標足平位置姿勢の今回値（時刻 $k$ での値）は、前記図23のS200で初期時刻 $T_s$ での足平位置姿勢を求めた場合と同様に求められる。

次いでS406に進み、目標床反力鉛直成分を満足する（ロボット1の鉛直方向の慣性力と重力との和を目標床反力鉛直成分に釣り合わせる）ような時刻 $k$ における全体重心鉛直位置速度の値（今回値）が算出される。具体的には、例えば前記図12の動力学モデルに係わる前記式01と式04とに基づいて、全体重心鉛直位置速度が算出される。すなわち、式01と式04とによれば、ロボット1の運動による全体重心鉛直加速度と重力加速度との和にロボット1の全体質量を乗算したものが床反力鉛直成分に等しいという関係式（ロボット1の全体重心の鉛直方向に関する運動方程式）が得られる。従って、この関係式と目標床反力鉛直成分とから、全体重心鉛直加速度が求められる。

尚、この関係式自体は、ロボット1のモデルに依存することなく一般的に成立するものである。そして、この求めた全体重心鉛直加速度を積分することにより、全体重心鉛直速度が算出され、さらにその全体重心

鉛直速度を積分することにより、全体重心鉛直位置が算出される。これらの算出は、より一般的には、次式 15 および式 16 で表される動力学関係式（ニュートンの運動方程式を離散化した式）を用いて行なわれる。

5 時刻  $k$  における全体重心鉛直速度

$$\begin{aligned} &= \text{時刻}(k - \Delta k) \text{ における全体重心鉛直速度} \\ &+ ((\text{床反力鉛直成分} / \text{ロボットの全体質量}) + \text{重力加速度}) * \Delta k \\ &(\text{ただし、重力加速度は負の値とする。}) \end{aligned}$$

…式 15

10

時刻  $k$  における全体重心鉛直位置

$$\begin{aligned} &= \text{時刻}(k - \Delta k) \text{ における全体重心鉛直位置} \\ &+ \text{時刻 } k \text{ における全体重心鉛直速度} * \Delta k \end{aligned}$$

…式 16

15

次いで S 408 に進み、全体重心鉛直位置を満足する上体鉛直位置が算出される。具体的には、例えば前記図 12 のモデルに係わる式 04 を用いて上体鉛直位置が算出される。すなわち、支持脚側及び遊脚側の目標足平位置姿勢の今回値から、図 12 のモデルの支持脚質点 2 m 及び遊脚質点 2 m の鉛直位置が求められる。そして、これらの求めた支持脚質点 2 m 及び遊脚質点 2 m の鉛直位置と、S 407 で求めた全体重心鉛直位置の今回値とを式 04 に適用することで、上体質点 3 m の鉛直位置が求められる。さらに、この求めた上体質点 3 m の鉛直位置と目標上体姿勢角の現在値（S 404 で設定された基準上体姿勢角または後述の S 414 で決定された前回（時刻  $k - \Delta k$ ）の目標上体姿勢角）とから上体鉛直位置が求められる。

25

次いでS 4 1 0に進み、前記図 1 5 のS 1 0 8で決定した歩容パラメータ（床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータ）に基づいて、図 2 0 に示した床反力水平成分許容範囲[Fxmin, Fxmax]の時刻 k における値（今回値）が求められる。

- 5 次いでS 4 1 1に進み、前記図 1 5 のS 1 0 9で決定した歩容パラメータ（床反力モーメント鉛直成分許容範囲を規定するパラメータ）に基づいて、図 2 1 に示した床反力モーメント鉛直成分許容範囲[Mzmin, Mzmax]の時刻 k における値（今回値）が求められる。

- 10 次いでS 4 1 2に進み、目標ZMPに関する動力学的平衡条件（ロボット 1 の慣性力と重力との合力が目標ZMPまわりに発生するモーメントの水平成分が0であるという条件）を満足するように、目標上体水平加速度と目標上体姿勢加速度との今回値が決定される。ただし、床反力水平成分  $F_x$  が[Fxmin, Fxmax]を越えないように、上体水平加速度と上体姿勢角加速度（より詳しくは、上体傾斜角加速度）とが決定される。
- 15 また、床反力モーメント鉛直成分  $M_z$  が[Mzmin, Mzmax]を越えないように、目標逆位相腕振り角加速度の今回値が決定される。

- 尚、上体姿勢角のうち、ヨー角は基準上体姿勢角のうちのヨー角に一致するように決定される。また、目標腕姿勢に関しては、逆位相腕振り角以外の成分は、基準腕姿勢に一致するように決定される。また、この
- 20 際、上記条件を満足しつつも、目標上体傾斜角と目標逆位相腕振り角とは、それぞれ基準上体傾斜角と基準逆位相腕振り角とになるべく追従するように決定される。以下にこの詳細を説明する。

- この時点において、前記の如く足平位置姿勢および上体鉛直位置の瞬時値（今回値）が決定されており、また、腕姿勢に関して、逆位相腕振り角以外の成分は、基準腕姿勢のそれに一致するように決定されている。
- 25 このため、残りの上体水平位置と上体姿勢角と逆位相腕振り角とを決定

すれば、ロボット1の目標運動は一義的に決定できる。したがって、すべての床反力も一義的に決定される。なお、本参考例では、定常歩容の目標床反力鉛直成分及び目標ZMPは、それぞれ前記図13のS022で決定した床反力鉛直成分軌道パラメータ及び目標ZMP軌道パラメータによって規定される。

ところで、歩容生成において、前記上体並進モードをあまり用いずに主に上体傾斜モードを用いることにより、目標ZMPを満足させる（目標ZMPまわりの床反力モーメントの水平成分を0にする）と、上体姿勢角が大きく振れ過ぎてしまう恐れがある。したがって、これを防ぐためには、なるべく上体並進モードを用いるべきである。しかし、上体並進モードは、床反力水平成分の変化を伴うので、床反力水平成分許容範囲が狭い場合には、上体並進モードを強く働かせるとスリップする恐れがある。この場合には、上体傾斜モードに頼るしかない。特に、前記走行歩容のように床反力水平成分許容範囲が0となる期間では、床反力水平成分を発生させるような歩容を生成することはできないので、上体傾斜モードに頼らざるを得ない。

一方、逆位相腕振り運動は、目標ZMPまわりの床反力モーメントの水平成分および床反力水平成分のいずれも変化させることなく、床反力モーメント鉛直成分のみを変化させることができるので、床反力モーメント鉛直成分が前記床反力モーメント鉛直成分許容範囲を越えないようにするために用いることができる。以上のことを考慮し、本参考例では、図26に示すフローチャートに従って、上体水平加速度と上体姿勢角加速度と逆位相腕振り加速度とが決定される。尚、理解の便宜上、上体水平加速度と上体姿勢角加速度（上体3の傾斜角の角加速度）の決定に関しては、サジタルプレーン上でX方向（前後方向）での上体水平加速度および上体姿勢角加速度を決定する場合を例にとって説明するが、実際



にはY方向（左右方向）の上体水平加速度および上体姿勢角加速度もX方向と同様に決定される。

まずS 5 0 0において、目標上体ヨー角に時刻  $k$  での基準上体ヨー角の値を代入する。また、腕姿勢の逆位相腕振り角・角速度成分を除き、  
5 目標腕姿勢に時刻  $k$  での基準腕姿勢の値を代入する。

次にS 5 0 2において現在時刻（定常歩容作成用タイマーの値） $k$  が、上体姿勢角・逆位相腕振り角復元期間（定常歩容の場合、上体姿勢角・逆位相腕振り角復元期間は、時刻  $T_m$  から時刻  $T_{s2}$  の期間および時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間である。）の間にあるか否かが判定される。S  
10 5 0 2の判定結果がNOであるならば、S 5 0 4に進み、YESであるならばS 5 3 0に進む。

S 5 0 4では、ロボット1の前回瞬時歩容状態（時刻  $k-1$  の歩容状態）から、仮に、上体傾斜モードの角加速度を0にして、上体並進モードの運動をロボット1にさせた場合に今回（時刻  $k$ ）の目標ZMPを満  
15 足するために必要な上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  が求められる。この  $\alpha_{tmp}$  は、例えば前記図12の動力学モデルに係わる前記式03yを用いて求められる。より具体的には、例えば、現在時刻  $k$  までに求められた目標足平位置姿勢の時系列値を用いて、現在時刻  $k$  における支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直加速度が求められると共に、現在時刻  $k$ （今  
20 回）の目標足平位置姿勢を用いて支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置が求められる。また、現在時刻  $k$ （今回）の床反力鉛直位置を用いて上体質点3mの鉛直位置が求められると共に、現在時刻  $k$  までに求めた目標上体鉛直位置の時系列値を用いて現在時刻  $k$  における上体質点3mの鉛直加速度が求められる。そして、これらの求めた値を前記式0  
25 3yに代入すると共に、同式03yの  $M_y$ 、 $d^2\theta_{by}/dt^2$  を0にしてなる式を、 $d^2X_b/dt^2$  について解くことにより、上体質点水平加速度が上体

- 水平加速度  $\alpha_{tmp}$  として求められる。尚、より厳密な動力学モデルを用いて、目標 ZMP 回りの床反力モーメントの水平成分を零にするような上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を探索的に求めるようにしてもよい。また、本参考例では、上体 3 の傾斜角に関する基準上体姿勢が鉛直姿勢で、該
- 5 基準上体姿勢による上体姿勢角加速度（上体 3 の傾斜角の角加速度）が 0 であるため、上体傾斜モードの角加速度を 0 にして上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を求めるようにした。但し、基準上体姿勢のうちの傾斜角が変化するように該基準上体姿勢軌道パラメータを設定した場合で、それにより定まる現在時刻  $k$  における基準上体姿勢角加速度（上体 3 の傾斜角の
- 10 基準角加速度）が 0 でない場合には、上体傾斜モードの角加速度をその 0 でない基準上体姿勢角加速度の値にして、上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を動力学モデルを用いて求める（例えば式 03y の  $d^2\theta_{by}/dt^2$  を 0 でない基準上体姿勢角加速度に設定して上記と同様に上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を求める）ようにすればよい。
- 15 次に、S506 に進み、上体水平加速度が  $\alpha_{tmp}$  の場合の時刻  $k$  における床反力水平成分  $F_{xtmp}$  が動力学モデルを用いて求められる。本参考例においては、前記動力学モデルの式 02x を用いて  $F_{xtmp}$  が求められる。すなわち、次式 17 によって  $F_{xtmp}$  が求められる。但し、 $d^2X_{sup}/dt^2$  および  $d^2X_{swg}/dt^2$  はそれぞれ時刻  $k$  における支持脚足
- 20 平質点水平加速度、遊脚足平質点水平加速度を表す。

$$F_{xtmp} = m_b * \alpha_{tmp} + m_{sup} * d^2X_{sup}/dt^2 + m_{swg} * d^2X_{swg}/dt^2 \quad \dots \text{式 17}$$

- 25 このようにして求められる  $F_{xtmp}$  の例を図 27 に示す。図 27 に、 $F_{xtmp}$  が床反力水平成分許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えている部分を

斜線で示す。

次に、S 5 0 8に進み、上体並進モードの上体水平加速度  $\alpha$ 、これによって発生する床反力水平成分  $F_x$ 、上体傾斜モードの上体角加速度  $\beta$  が次のように決定される (S 5 0 8 ~ S 5 1 6)。

5 すなわち、

$F_{x\text{tmp}} > F_{x\text{max}}$  ならば、S 5 1 0に進み、次式により  $F_x$  が決定される。

$$F_x = F_{x\text{max}} \quad \cdots \text{式 1 8}$$

10

$F_{x\text{tmp}} < F_{x\text{min}}$  ならば、S 5 1 2に進み、次式により  $F_x$  が決定される。

$$F_x = F_{x\text{min}} \quad \cdots \text{式 1 9}$$

15 それ以外、すなわち、 $F_{x\text{tmp}}$  が、床反力水平成分許容範囲  $[F_{x\text{min}}, F_{x\text{max}}]$ 内に存するならば、S 5 1 4に進み、次式により  $F_x$  が決定される。

$$F_x = F_{x\text{tmp}} \quad \cdots \text{式 2 0}$$

20

いずれの場合においても、次いでS 5 1 6に進み、次式により上体水平加速度  $\alpha$ 、上体姿勢角加速度 (上体傾斜角加速度)  $\beta$  が決定される。

$$\alpha = \alpha_{\text{tmp}} + (F_x - F_{x\text{tmp}}) / \Delta F_p \quad \cdots \text{式 2 1}$$

$$25 \quad \beta = (\alpha_{\text{tmp}} - \alpha) * \Delta M_p / \Delta M_r \quad \cdots \text{式 2 2}$$

ただし、 $\Delta F_p$ 、 $\Delta M_p$  および  $\Delta M_r$  はそれぞれ前記式 06、07、および式 09 により決定される。

補足すると、より動力学演算の精度を高めようとするならば、上記のごとく上体角加速度  $\beta$  を求めた後、上体並進モードと上記求めた上体角  
5 加速度  $\beta$  の上体傾斜モードとを合成した運動が目標 ZMP を満足するように、上体並進モードの上体水平加速度  $\alpha$  を、より厳密な動力学モデルを用いて解析的あるいは探索的に決定した方がよい。なお、探索的な決定法としては、擬似ヤコビアン（感度マトリックス）を求め、擬似ニュートン法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス法などを用  
10 いればよい。

さらに床反力水平成分  $F_x$  が床反力水平成分許容範囲 [ $F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ] を厳密に越えないようにするために、S510においては、 $F_x = F_{xmax}$  かつ目標 ZMP まわりの床反力モーメントの水平成分が 0 になるように、S512においては、 $F_x = F_{xmin}$  かつ目標 ZMP まわ  
15 りの床反力モーメントの水平成分が 0 になるように、上体水平加速度  $\alpha$  と上体角加速度  $\beta$  との組を探索的に求めてもよい。

上記のように求められる  $F_x$  を図 28 に示す。 $F_x$  は、 $F_{xtmp}$  の値を床反力水平成分許容範囲 [ $F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ] から越えないように制限（飽和）させたものになっている。より詳しくは、上体並進モードのみによ  
20 る上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  に応じた  $F_{xtmp}$  が許容範囲 [ $F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ] 内にある場合には、 $F_{xtmp}$  がそのまま  $F_x$  となる。また、上体並進モードのみによる上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  に応じた  $F_{xtmp}$  が許容範囲 [ $F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ] の上限を超え、もしくは下限を下回った場合には、それぞれ  $F_x$  は、それぞれ強制的に  $F_{xmax}$ 、 $F_{xmin}$  に制限される。特に走行歩容の  
25 空中期では、常に、 $F_{xmax} = F_{xmin} = 0$  であるので、 $F_x = 0$  となる。

また、上記のように求められる上体姿勢角加速度  $\beta$  を図 29 に示す。

- 上体並進モードによって発生する  $F_x$  が許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えないように、上体並進モードの加速度を制限したことによって不足した床反力モーメント（より詳しくは目標 ZMP 回りの床反力モーメントの水平成分を 0 にする上で必要な慣性力モーメントから、制限した上体水平運動と両脚体 2, 2 の運動とによるモーメント成分を差し引いたモーメント）を、上体傾斜モードで補ったことになる。なお、走行歩容の空中期では、上体並進モードによる上体水平加速度  $\alpha$  は常に 0 に制限されることとなるので、上体傾斜モードによる上体姿勢角加速度  $\beta$  のみによって、上記不足分の床反力モーメントが補われることとなる。
- 10 次に、S 5 1 8 に進み、仮に上体並進モードの上体水平加速度が  $\alpha$ 、上体傾斜モードの上体角加速度（上体傾斜角加速度）が  $\beta$ 、上体ヨ一回転モードの上体加速度（上体ヨ一角加速度）が基準ヨ一角加速度  $d^2\theta_{bzref}/dt^2$ 、逆位相腕振り角加速度  $\beta_a$  が基準逆位相腕振り角加速度  $d^2\theta_{azref}/dt^2$  である運動をさせた場合の床反力モーメント鉛直成分
- 15  $M_{ztmp}$  を求める。以降、 $d^2\theta_{bzref}/dt^2$  を  $\beta_{bref}$ 、 $d^2\theta_{azref}/dt^2$  を  $\beta_{aref}$  とする。

具体的には、式 0 3 z に、式 1 0 0 1 から式 1 0 0 4 を代入することによって得られる  $M_z$  が  $M_{ztmp}$  である。

$$\begin{array}{ll}
 20 \quad d^2X_b/dt^2 = \alpha_x & \dots \text{式 1 0 0 1} \\
 \quad d^2Y_b/dt^2 = \alpha_y & \dots \text{式 1 0 0 2} \\
 \quad d^2\theta_{bz}/dt^2 = \beta_{bref} & \dots \text{式 1 0 0 3} \\
 \quad d^2\theta_{az}/dt^2 = \beta_{aref} & \dots \text{式 1 0 0 4}
 \end{array}$$

- 25 ただし、 $\alpha_x$  は、上体水平加速度  $\alpha$  の X 成分、 $\alpha_y$  は、上体水平加速度  $\alpha$  の Y 成分を表す。また、 $X_b$ 、 $Y_b$  には時刻  $k-1$  における上体水平

位置を代入し、 $X_{zmp}$ 、 $Y_{zmp}$ 、 $X_{sup}$ 、 $d^2Y_{sup}/dt^2$ 、 $X_{swg}$ 、 $d^2Y_{swg}/dt^2$ には、時刻  $k$  の値を代入するものとする。

このようにして求められる  $M_{ztmp}$  の例を図 3 2 に示す。図 3 2 に、 $M_{ztmp}$  が床反力モーメント鉛直成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  を越えている部分を斜線で示す。

次に、S 5 2 0 に進み、逆位相腕振り角加速度  $\beta a$  が次のように決定される (S 5 2 0 ~ S 5 2 8)。

すなわち、

$M_{ztmp} > M_{zmax}$  ならば、S 5 2 2 に進み、次式により  $M_z$  が決定される。

$$M_z = M_{zmax} \quad \cdots \text{式 1 0 1 8}$$

$M_{ztmp} < M_{zmin}$  ならば、S 5 2 4 に進み、次式により  $M_z$  が決定される。

$$M_z = M_{zmin} \quad \cdots \text{式 1 0 1 9}$$

それ以外、すなわち、 $M_{ztmp}$  が、床反力水平成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  内に存するならば、S 5 2 6 に進み、次式により  $M_z$  が決定される。

$$M_z = M_{ztmp} \quad \cdots \text{式 1 0 2 0}$$

いずれの場合においても、次いで S 5 2 8 に進み、次式により逆位相腕振り角加速度  $\beta a$  が決定される。

$$\beta a = \beta a_{ref} + (M_{ztmp} - M_z) / \Delta M_{az} \quad \dots \text{式 1021}$$

ただし、 $\Delta M_{az}$  は式 09a により決定される。

5 以下に S 518 から S 528 までの処理を解説する。

上記のように求められる  $M_z$  は、逆位相腕振りを含めたロボット全体の運動による床反力モーメント鉛直成分を示している。

上記処理では、この  $M_z$  が床反力モーメント鉛直成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  を越えないように逆位相腕振り角加速度  $\beta a$  が決定されている。具体的には、 $M_z$  は、図 33 に示すように、 $M_{ztmp}$  の値を床反力水平成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  から越えないように制限（飽和）させたものに決定されている。より詳しくは、 $M_{ztmp}$  が許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  内にある場合には、 $M_{ztmp}$  がそのまま  $M_z$  となり、 $M_{ztmp}$  が許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  の上限を越え、もしくは下限を下回った場合には、それぞれ  $M_z$  は、それぞれ強制的に  $M_{zmax}$ 、 $M_{zmin}$  に制限される。特に走行歩容の空中期では、常に、 $M_{zmax} = M_{zmin} = 0$  であるので、 $M_z = 0$  となる。

$M_z$  が床反力モーメント鉛直成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  を越えないようにするために、逆位相腕振りによって発生すべきモーメント鉛直成分  $M_{az}$  は、 $(M_z - M_{ztmp})$  である。 $M_{az}(= M_z - M_{ztmp})$  を図 34 に示す。

逆位相腕振り角加速度  $\beta a$  は、 $M_{az}$  を逆位相腕振りの等価慣性モーメント  $\Delta M_{az}$  で割ったものを基準逆位相腕振り角加速度  $\beta a_{ref}$ （基準逆位相腕振り角を 2 階微分した値）に加えることによって得られる。すなわち、 $\beta a$  は前記式 1021 で求められる。逆位相腕振り角加速度  $\beta a$  を図 35 に示す。

## 100

以上のごとく S 5 0 4 から S 5 2 8 までの処理では、逆位相腕振りを含めたロボット全体の運動によって発生する床反力モーメント鉛直成分  $M_z$  が許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  を越えないように（逆位相腕振り角加速度を基準逆位相腕振り角加速度  $\beta_{aref}$  に一致させた場合に発生する

5 床反力モーメント鉛直成分  $M_{ztmp}$  が許容範囲を越えた分を打ち消す（キャンセルする）ように）、逆位相腕振り角加速度  $\beta_a$  が決定される。

補足すると、床反力モーメント鉛直成分  $M_z$  が床反力モーメント鉛直成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  を厳密に越えないようにするために、S 5 0 4 から S 5 2 8 までの処理の代わりに、逆位相腕振り角加速度  $\beta$   
10  $a$  を、より厳密な動力学モデルを用いて解析的あるいは探索的に決定した方がよい。なお、探索的な決定法としては、擬似ヤコビアン（感度マトリックス）を求め、擬似ニュートン法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス法などを用いればよい。

以上が、時刻  $k$  が上体姿勢角・逆位相腕振り角復元期間の間でない場合  
15 の処理である。

S 5 0 2 の判定結果が Y E S である場合には以下の処理が行われる。まず、S 5 3 0 に進み、ロボット 1 の前回瞬時歩容状態（時刻  $k - 1$  の歩容状態）から、上体傾斜モードの角加速度を 0 にして、上体並進モードの運動をロボット 1 にさせた場合に今回（時刻  $k$ ）の目標 Z M P を満  
20 足するために必要な上体水平加速度  $\alpha$  が求め、これを最終的な上体水平加速度と決定する。

次に、S 5 3 2 に進み、上記場合に床反力水平成分  $F_x$  を求める。

次に、S 5 3 4 に進み、上体姿勢角加速度（上体傾斜角加速度） $\beta$  を 0 に決定する。なお、上体ヨー角加速度は、基準上体ヨー角加速度  $\beta$   
25  $b_{ref}$ （基準上体ヨー角を 2 階微分した値）に決定される。

次いで最後に、S 5 3 6 に進み、逆位相腕振り角加速度  $\beta_a$  に、基準



逆位相腕振り角加速度  $\beta_{aref}$  (基準逆位相腕振り角を2階微分した値) を代入する。

以上が、S 5 0 2 の判定結果が Y E S である場合の処理である。すなわち、この場合には、上体姿勢角加速度 (上体傾斜角加速度および上体  
5 ヨー角加速度) を基準上体姿勢角加速度に、逆位相腕振り角加速度を基準逆位相腕振り角加速度に一致させる。このようにしても運動によって発生する床反力が、床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲のいずれも越えないと予想されているので、このように決定しても問題ない。

- 10 S 5 2 8 または S 5 3 6 の処理の後、図 2 5 の S 4 1 4 に進み、S 4 1 2 で求めた上体水平加速度を逐次積分する (時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する) ことにより上体水平速度が求められ、さらにその上体水平速度を逐次積分する (時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する) ことにより、上体水平位置 (今回値) が求められる。また、S 4 1  
15 2 で求めた上体姿勢角加速度を逐次積分する (時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する) ことにより上体姿勢角速度が求められ、さらにその上体姿勢角速度を逐次積分する (時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する) ことにより、上体姿勢角 (今回値) が求められる。

- 次に S 4 1 6 に進み、S 4 1 2 で求めた逆位相腕振り加速度  $\beta_a$  を逐  
20 次積分する (時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する) ことにより逆位相腕振り速度が求められ、さらにこれを逐次積分する (時刻  $T_s$  から現在時刻  $k$  まで累積加算する) ことにより、逆位相腕振り角  $\theta_{az}$  (今回値) が求められる。

- 以上のごとく図 2 4 の S 3 0 6 の定常歩容瞬時値決定サブルーチンが  
25 実行された後、S 3 0 8 に進み、歩容生成用時刻  $k$  の値が歩容生成インターバル  $\Delta k$  だけ増加される。次いで S 3 0 4 に戻り、S 3 0 4 に示

## 102

す条件が成立している限り、S 3 0 6 と S 3 0 8 の処理が繰り返され、  
S 3 0 4 に示す条件が成立しなくなったら、すなわち終端（時刻  $T_e = T_s + T_{cyc}$ ）まで仮歩容の生成が完了したら、S 3 1 0 に進む。

5 定常歩容では、それを繰り返したときに境界でロボット 1 の運動状態  
が不連続にならないように、初期上体姿勢角及びその角速度を決定する  
必要がある。

そのために、S 3 1 0 では、上体姿勢角速度を、時刻  $T_e$  までに、初  
期値（時刻  $T_s$  での値）に戻すための上体姿勢角加速度を発生させる床  
反力モーメントの Z M P 換算値（以降、上体姿勢復元モーメント Z M P  
10 換算値と呼び、Z M P  $_{rec}$  と略す）のパターンを設定する。

これについて以下に詳細に説明する。

上体姿勢角・逆位相腕振り角復元期間（時刻  $T_m$  から時刻  $T_{s2}$  の期  
間および時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間）に、上体傾斜モードを用いて  
上体姿勢角加速度を発生させることにより、上体姿勢角速度を初期値  
15 （時刻  $T_s$  での値）に戻すことを考える。このための上体姿勢角加速度  
パターンを、 $\beta(k)$  とする。なお、上記期間以外では、 $\beta(k)=0$  とする。

上体傾斜モードでは、上体姿勢角加速度  $\beta(k)$  を発生させようとする  
と、床反力モーメント  $\beta(k) * \Delta M_r$  が発生する。この結果、その瞬間  
における床反力鉛直成分が  $F_z(k)$  であるとする、（目標 Z M P でな  
20 く）運動から算出される Z M P  $(k)$  は、次式で求められる  $\Delta Z M P$  だけ  
ずれる。

$$\Delta Z M P(k) = -\beta(k) * \Delta M_r / F_z(k) \quad \dots \text{式 2 3}$$

25 したがって、 $\Delta M_r$  のパターンと  $F_z(k)$  のパターンが決まっていれば  
（既知であれば）、 $\Delta Z M P(k)$  のパターンを適当に設定することによ

って、式 23 を満足する上体姿勢角加速度パターンを発生させて、上体姿勢角速度を初期値（時刻  $T_s$  での値）、すなわち基準上体姿勢軌道の初期（時刻  $T_s$ ）状態における上体姿勢角速度に戻すことができる。

前記上体姿勢復元モーメント  $ZMP$  換算値（ $ZMP_{rec}$ ）は、そのように適切に設定された  $\Delta ZMP(k)$  を意味する。前記式 23 を用いて上体姿勢復元モーメント  $ZMP$  換算値を設定する際に、 $\Delta M_r$  は厳密には変動するが、近似的に一定値としても良い。定常歩容は仮に生成されるだけであり、実際のロボットをこの歩容に追従させるわけではないので、定常歩容の動力学的精度はあまり高くなくても良いからである。

図 30 に  $ZMP_{rec}$  の一例を示す。図 30 では、 $ZMP_{rec}$  のパターンとして、時刻  $T_m$  から時刻  $T_{s2}$  の期間および時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間に台形パターンが形成されている。その台形部の折れ点の時刻は、時刻  $T_m$  と時刻  $T_{s2}$  との間の期間および時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間における目標  $ZMP$  パターンの折れ点の時刻（図 22 参照）に一致させてある。これは、後述するが、今回歩容の目標  $ZMP$  パターンの修正が簡単になるからである。

式 23 の  $\Delta ZMP(k)$  に  $ZMP_{rec}(k)$  を代入することにより次式が得られる。

$$\beta(k) = -ZMP_{rec}(k) * F_z(k) / \Delta M_r \quad \cdots \text{式 24}$$

したがって、この式 24 で求められる  $\beta(k)$  は、図 31 の実線で示すようになる。なお、図 31 の点線で示すものは、時刻  $T_s$  から時刻  $T_m$  までの期間および時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間の上体姿勢角加速度（図 29 の実線示のもの）である。（以降、時刻  $k$  での値であることが明らかな場合には、 $(k)$  を省略する場合がある。）

104

初期（時刻  $T_s$ ）上体姿勢角は、初期（時刻  $T_s$ ）基準上体姿勢角に一致させる。

また、初期上体姿勢角速度は、式 37 a、37 b を満たすように決定する。

5

終端上体姿勢角－初期上体姿勢角

＝床反力水平成分許容範囲を満たすように決定された上体姿勢角加速度の 2 階積分

＋ Z M P rec によって発生する上体姿勢角加速度の 2 階積分

10      ＋初期上体姿勢角速度＊定常歩容の周期

……式 37 a

終端上体姿勢角速度－初期上体姿勢角速度

＝床反力水平成分許容範囲を満たすように決定された上体姿勢角加速

15      度の 1 階積分

＋ Z M P rec によって発生する上体姿勢角加速度の 1 階積分

……式 37 b

なお、式 37 a、37 b のそれぞれの右辺第 1 項の積分期間は、時刻  
20       $T_s$  から  $T_m$  までの期間と、 $T_{s2}$  から  $T_{m2}$  までの期間とを合わせた期間  
であり、右辺第 2 項の積分期間は、時刻  $T_m$  から  $T_{s2}$  までの期間と  
 $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間とを合わせた期間である。

より具体的に説明すると定常歩容では、第 1 巡回歩容の支持脚座標系  
（次回歩容支持脚座標系）から見た初期状態姿勢角及び角速度が、それ  
25      ぞれ、次の第 1 巡回歩容の支持脚座標系（次々次回歩容支持脚座標系）  
から見た終端上体姿勢角および角速度に一致していなければならない。

そこで、本参考例では、初期（時刻  $T_s$ ）上体姿勢角は、初期（時刻  $T_s$ ）基準上体姿勢角の値に決定し、これと、これを定常歩容におけるロボット1のトータルの旋回角（鉛直軸回りの旋回角）に応じたマトリクス（回転座標変換のマトリクス）により次回歩容支持脚座標系から見た値に座標変換したものとをそれぞれ式37aの左辺の初期上体姿勢角、  
5 終端上体姿勢角に代入する。また、式37a, 37bのそれぞれの右辺第1項の積分に係る上体姿勢角加速度は、前記図26のS518で求められたものが用いられる。

そして、式37a, 37bの初期上体姿勢角速度と、式37a, 37bの右辺第2項の積分に係るZMP<sub>rec</sub>（図30の台形状のパターン）の台形高さをと未知数として（但し、ZMP<sub>rec</sub>の台形パターンの折れ点の時刻は前記のごとくあらかじめ定める。また、第1旋回歩容のZMP<sub>rec</sub>の台形高さ  $acyc1$  と第2旋回歩容のZMP<sub>rec</sub>の台形高さ  $acyc2$  を同一値とする。）、それらの未知数を含む式37a, 37bの連立方程  
10 式を解くことにより求められる初期上体姿勢角速度を新たな初期上体姿勢角速度として決定する。この場合、式37bの終端上体姿勢角速度は、未知数である初期上体姿勢角速度を、定常歩容の上記トータルの旋回角に応じたマトリクスにより次回支持脚座標系から見た値に座標変換したものである。

20 次いでS312に進み、上体傾斜復元モーメントZMP換算値（ZMP<sub>rec</sub>）パターンを基に、これによる上体水平位置・速度への影響量を求め、終端上体水平位置・速度に加算する。

この処理について解説する。なお、その詳細は、本願出願人のPCT/JPO2/13592にて説明されているので、ここでは簡略な説明  
25 に留める。

時刻  $T_s$  から  $T_m$  の期間および時刻  $T_{s2}$  から  $T_e$  の期間において、上

. 1 0 6

記のごとく上体傾斜復元モーメント Z M P 換算値 ( Z M P rec ) パターンを発生するように上体姿勢角加速度  $\beta$  を変化させると、上体姿勢角加速度  $\beta$  は、次式のようにになる。

$$5 \quad \beta = -Z M P \text{ rec} * F_z / \Delta M_r \quad \dots \text{式 } 1025$$

上体傾斜復元モーメントを発生させない場合に目標 Z M P を満足する上体水平加速度は、S 5 3 2 において求めたごとく  $\alpha_{tmp}$  であるが、上記のごとく上体姿勢角加速度  $\beta$  を変化させると、目標 Z M P を満足する  
10 ために必要な上体水平加速度  $\alpha$  は、次式のようにになる。

$$\alpha = \alpha_{tmp} - (\Delta M_r / \Delta M_p) * \beta \quad \dots \text{式 } 1026$$

式 1 0 2 5 および 1 0 2 6 より、

15

$$\alpha = \alpha_{tmp} + Z M P \text{ rec} * F_z / \Delta M_p \quad \dots \text{式 } 1027$$

すなわち、上体傾斜復元モーメント Z M P 換算値 ( Z M P rec ) によって、加速度が式 1 0 2 7 の右辺第 2 項分だけ増加する。

20 式が線形であることを利用すると、上記のごとく上体傾斜復元モーメント Z M P 換算値 ( Z M P rec ) パターンを発生するように上体姿勢角加速度  $\beta$  を変化させた場合の終端上体水平速度は、上体傾斜復元モーメント Z M P 換算値 ( Z M P rec ) パターンを発生させなかった場合の終端上体水平速度、すなわち S 4 1 4 で求めた上体水平速度の終端値に、  
25 時刻  $T_s$  から  $T_e$  までの ( Z M P rec \*  $F_z / \Delta M_p$  ) の 1 階積分を加算したものとして求められる。また、上記のごとく上体傾斜復元モーメント

ZMP換算値（ZMP<sub>rec</sub>）パターンを発生するように上体姿勢角加速度 $\beta$ を変化させた場合の終端上体水平位置は、上体傾斜復元モーメントZMP換算値（ZMP<sub>rec</sub>）パターンを発生させなかった場合の終端上体水平位置、すなわちS414で求めた上体水平位置の終端値に、時刻  
5 Ts から Te までの（ZMP<sub>rec</sub>\*Fz/ $\Delta M_p$ ）の2階積分を加算したものとして求められる。

S312の処理を完了した後、S314に進み、逆位相腕振り角速度が初期と終端で一致するように逆位相腕振り復元角加速度（ $\beta_{arec}$ ）パターンを決定する。

10 具体的には、逆位相腕振り復元角加速度パターンを図36のように台形状に設定し、時刻T<sub>m</sub>からTs<sub>2</sub>までの期間の台形高さazcyc2と時刻T<sub>m2</sub>からTeまでの期間の台形高さazcyc1を同一とし、時刻TsからTeまでの $\beta_{arec}$ の積分値と床反力モーメント鉛直成分Mzが許容範囲を越えないようにするための前記求めた逆位相腕振り加速度 $\beta_a$ の積分  
15 値との和が0となるように台形高さazcyc1、azcyc2を決定する。なお、両区間の台形高さは、同一でなくとも構わない。

補足すると、このように決定した逆位相腕振り復元角加速度パターンによって発生する床反力モーメント鉛直成分（Maz<sub>rec</sub>）は、図37のようになる。したがって、逆位相腕振りを含むロボットの運動によって  
20 発生する床反力モーメント鉛直成分Mzは、最終的には、図38に示すごとく、図32のMztmpと図34のMazと図37のMaz<sub>rec</sub>との和、すなわち、図33のMzと図37のMaz<sub>rec</sub>との和になる。時刻T<sub>m</sub>からTs<sub>2</sub>までの期間および時刻T<sub>m2</sub>からTeまでの期間においては、台形状の復元モーメントが加算されるが、これらの期間は、許容範囲が十  
25 分に広い期間に設定されているので、逆位相腕振りを含むロボットの運動によって発生する床反力モーメント鉛直成分は、許容範囲を越えるこ

とはない。

次に S 3 1 6 に進み、定常歩容の初期（時刻  $T_s$ ）逆位相腕振り角および角速度を決定する。

具体的には、初期逆位相腕振り角速度は、以下の式によって決定する。

5

初期逆位相腕振り角速度

= 基準初期逆位相腕振り角速度

− ( $\beta_{arec}$  が 0 の場合の逆位相腕振り角  
+  $\beta_{arec}$  パターンの 2 階積分) /  $T_{cyc}$

…式 1 0 3 0

10

ただし、上式において、 $\beta_{arec}$  が 0 の場合の逆位相腕振り角とは、S 4 1 6 において求めた逆位相腕振り角（時刻  $T_e$  における逆位相腕振り角）のことである。また、 $\beta_{arec}$  の 2 階積分とは、図 3 6 のように設定した逆位相腕振り復元角加速度の時刻  $T_s$  から  $T_e$  までの 2 階積分値である。また、基準初期逆位相腕振り角速度は前記基準逆位相腕振り角速度（基準逆位相腕振り角  $\theta_{aref}$  の 1 階微分値）の時刻  $T_s$  での値である。

15

初期逆位相腕振り角は、基準初期逆位相腕振り角に一致させれば良い。または、最終的に決定された逆位相腕振り角加速度（すなわち、床反力モーメント鉛直成分  $M_z$  が許容範囲を越えないようにするための前記求めた逆位相腕振り加速度  $\beta_a$  と復元角加速度  $\beta_{arec}$  の和）と上記求めた初期逆位相腕振り角速度を基に、仮に初期逆位相腕振り角を基準初期逆位相腕振り角に一致させた場合に算出される腕振り角と基準逆位相腕振り角との差の平均値または前記差の最大値と最小値の平均値を求め、求めた平均値の 2 分の 1 を基準初期逆位相腕振り角から減じた値を最終的な初期逆位相腕振り角として決定しても良い。このようにすることで、

20

25



算出される腕振り角と基準逆位相腕振り角との差の絶対値が大きくなり過ぎることを防止することができる。

時刻  $T_s$ 、 $T_m$ 、 $T_{s2}$  および  $T_{m2}$  を前記のごとく設定した理由のひとつは、時刻  $T_m$  から  $T_{s2}$  までの期間と時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間と  
5 において、上体姿勢角速度を基準上体姿勢軌道の初期角速度に戻すように上体姿勢角加速度  $\beta$  を発生させても、床反力水平成分  $F_x$  が許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えないようにするためである。換言すれば、時刻  $T_m$  から  $T_{s2}$  までの期間と時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間とにおいては、  
床反力水平成分許容範囲が十分に大きいため、目標 ZMP を満足しつつ、  
10 上体姿勢角速度を戻すように上体姿勢角加速度  $\beta$  を発生させても、床反力水平成分  $F_x$  は、許容範囲を越えることがない。

また時刻  $T_s$ 、 $T_m$ 、 $T_{s2}$  および  $T_{m2}$  を前記のごとく設定したもうひとつの理由は、時刻  $T_m$  から  $T_{s2}$  までの期間と時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間とにおいて、逆位相腕振り角速度を基準逆位相腕振り角軌道の初期角速度に戻すように逆位相腕振り角加速度  $\beta_a$  を発生させても、床反  
15 力モーメント鉛直成分  $M_z$  が許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  を越えないようにするためである。換言すれば、時刻  $T_m$  から  $T_{s2}$  までの期間と時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間とにおいては、床反力モーメント鉛直成分許容範囲が十分に大きいため、逆位相腕振り角速度を戻すように逆位相腕振り  
20 角加速度  $\beta_a$  を発生させても、床反力モーメント鉛直成分  $M_z$  は、許容範囲を越えることがない。

以上のごとく図 24 の S316 の処理が完了した後、図 23 の S210 に進み、生成した歩容（仮定常歩容）の終端上体水平位置・速度を、その瞬間の支持脚に対応する支持脚座標系（図 17 の  $X'''$ 、 $Y'''$ 、 $Z'''$  座標系）から見た値に変換し、その値を  $(X_e, V_{xe})$  とする（ $X_e$  : 終端上体水平位置、 $V_{xe}$  : 終端上体水平速度）。

次いでS 2 1 2に進み、図示の如く、初期上体水平位置速度 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) と終端上体水平位置速度 ( $X_e$ ,  $V_{xe}$ ) との差を算出する。この差 ( $X_s - X_e$ ,  $V_{xs} - V_{xe}$ ) を上体水平位置速度境界条件誤差 ( $errx$ ,  $errvx$ ) と呼ぶ。定常歩容では、前記境界条件を満たす必要  
5 があるので、( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) と ( $X_e$ ,  $V_{xe}$ ) とが一致していなければならない。従って、上体水平位置速度境界条件誤差 ( $errx$ ,  $errvx$ ) が零またはほぼ零でなければならない。本参考例では、以下のように、上体水平位置速度境界条件誤差 ( $errx$ ,  $errvx$ ) がほぼ零となる ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) が探索的に求められる。

- 10 次いでS 2 1 4に進み、算出した上体水平位置速度境界条件誤差 ( $errx$ ,  $errvx$ ) が、あらかじめ適宜設定された許容範囲内にあるか否かが判断される。尚、このように上体水平位置速度境界条件誤差の許容範囲を設定する代わりに、初期発散成分 ( $X_s + V_{xs} / \omega_0$ ) と終端発散成分 ( $X_e + V_{xe} / \omega_0$ ) との差、および初期収束成分 ( $X_s - V_{xs} / \omega_0'$ ) と終端収束成分 ( $X_e - V_{xe} / \omega_0'$ ) との差がそれぞれある許容範囲内にあるか否か判断するようにしても良い。ただし  $\omega_0$ ,  $\omega_0'$  は、前述したように、ある所定の値である。

- S 2 1 4の判断結果がNOであるときにはS 2 1 6に進む。このS 2 1 6では、( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) の付近に複数 (本参考例では2つ) の初期  
20 値候補 ( $X_s + \Delta X_s$ ,  $V_{xs}$ ), ( $X_s$ ,  $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ) が決定される。ここで、 $\Delta X_s$ ,  $\Delta V_{xs}$  は、それぞれ  $X_s$ ,  $V_{xs}$  に対する所定の微小変化量を意味している。そして、これらの初期値候補のそれぞれを上体水平位置速度の初期状態として、前記S 2 0 8と同様の処理によって定常歩容が歩容パラメータを用いて生成される。さらに、その生  
25 成された定常歩容の終端上体位置速度を、その瞬間の支持脚に対応する支持脚座標系 (図17の  $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$ 座標系) から見た値に変換し

111

た値  $(X_e + \Delta X_{e1}, V_{xe} + \Delta V_{xe1})$ ,  $(X_e + \Delta X_{e2}, V_{xe} + \Delta V_{xe2})$  が求められる。ここで、 $(X_e + \Delta X_{e1}, V_{xe} + \Delta V_{xe1})$  は  $(X_s + \Delta X_s, V_{xs})$  に対応する終端上体位置速度を意味し、 $(X_e + \Delta X_{e2}, V_{xe} + \Delta V_{xe2})$  は  $(X_s, V_{xs} + \Delta V_{xs})$  に対応する終端上体位置速度を意味している。なお、この場合の定常歩容（仮歩容）の生成処理では、上体水平位置速度以外の変数の初期状態（時刻  $T_s$  での状態）は、例えば上体水平位置速度の初期値候補を  $(X_s, V_{xs})$  とした場合と同一に設定すればよい。S 2 1 6 ではさらに、前記 S 2 1 0 と同様の処理によって、各初期値候補とこれに対応する終端上体位置速度との差、すなわち、各初期値候補  $(X_s + \Delta X_s, V_{xs})$ ,  $(X_s, V_{xs} + \Delta V_{xs})$  のそれぞれに対応する上体水平位置速度境界条件誤差が求められる。

次いで S 2 1 8 に進み、 $(X_s, V_{xs})$  およびその付近の初期値候補  $(X_s + \Delta X_s, V_{xs})$ ,  $(X_s, V_{xs} + \Delta V_{xs})$  のそれぞれに対する上体水平位置速度境界条件誤差を基に、 $(X_s, V_{xs})$  の次の初期値候補が探索法（擬似ヤコビアン（感度マトリックス）を求め、最急降下法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス法など）により決定される。すなわち、 $(X_s, V_{xs})$  およびその付近の初期値候補  $(X_s + \Delta X_s, V_{xs})$ ,  $(X_s, V_{xs} + \Delta V_{xs})$  のそれぞれに対する上体水平位置速度境界条件誤差によって、上体水平位置及び上体水平速度をそれぞれ初期値候補  $(X_s, V_{xs})$  から微小変化させたときの、上体水平位置速度境界条件誤差の変化度合いを示す感度マトリックスが求められ、その感度マトリックスに基づいて、上体水平位置速度境界条件誤差をより小さくするような初期値候補  $(X_s, V_{xs})$  が新たに決定される。そして、このように上体水平位置速度の新たな初期値候補  $(X_s, V_{xs})$  が決定された後、S 2 0 6 に戻る。

## 1 1 2

S 2 1 4 の判断結果が N O となる限りは上記した処理 (S 2 0 6 ~ S 2 1 8 の処理) が繰り返される。なお、この場合、上体水平位置速度の新たな初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) に対応する定常歩容の生成処理 (S 2 0 8) における S 3 0 0 (図 2 4 参照) では、上体姿勢角速度の初期値は、基準上体姿勢角速度の初期値ではなく、上体水平位置速度の  
5 前回の初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) に対応する S 2 0 8 の処理における S 3 1 0 (図 2 4 参照) で決定したものに設定される。そして、S 2 1 4 の判断結果が Y E S になると、繰り返しループ (S 2 0 4) を抜けて S 2 2 0 に進む。なお、S 2 0 4 の繰り返しループを抜けたときの直前に生  
10 成された仮定常歩容が、境界条件を満たす定常歩容として得られることとなる。

S 2 2 0 では、本来の初期時刻 0 (今回歩容の終端時刻) における初期上体水平位置速度 ( $X_0$ ,  $V_0$ ) と初期時刻 0 における初期上体鉛直位置速度 ( $Z_0$ ,  $V_{z0}$ ) と初期時刻 0 における初期上体姿勢角および  
15 角速度が求められる。

具体的には、( $X_0$ ,  $V_0$ ) と ( $Z_0$ ,  $V_{z0}$ ) は、S 3 1 0 において決定された上体傾斜復元モーメント Z M P 換算値パターン、時刻  $T_s$  における定常歩容の初期上体姿勢角および角速度と、S 2 0 4 のループを抜けた後の時刻  $T_s$  における上体水平位置速度 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) を基に、歩容の条  
20 件を満足するように歩容を生成した場合における、第 2 巡回歩容から第 1 巡回歩容に切り換わった瞬間の時刻、すなわち、時刻  $k = T_{cyc}$  (時刻  $T_e - T_s$ ) であるときに決定される上体水平位置速度と上体鉛直位置速度とを、それぞれ時刻  $T_{cyc}$  から始まる一步 (すなわち 2 度目の第 1 巡回歩容) の支持脚に対応する支持脚座標系 (図 1 7 の  $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$   
25 座標系) から見た値に変換した値に決定される。同様に、初期状態姿勢角および角速度は、時刻  $k = T_{cyc}$  (時刻  $T_e - T_s$ ) であるときに決定さ

## 1 1 3

れる上体姿勢角及び角加速度を、時刻  $T_{cyc}$  から始まる一步（すなわち 2 度目の第 1 旋回歩容）の支持脚に対応する支持脚座標系（図 1 7 の  $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$  座標系）から見た値に変換した値に決定される。

次いで S 2 2 2 に進み、定常歩容初期発散成分  $q[0]$  が次式から求  
5 められる。

$$q[0] = X_0 + V_0 / \omega_0 \quad \dots \text{式 4 0}$$

ただし  $\omega_0$  は、発散についての解説で述べたように、ある所定の値である。

10 次に S 2 2 4 に進み、定常歩容初期発散成分  $q[0]$  が今回歩容支持脚座標系から見た値に変換され、これが  $q''[0]$  として求められる。  
また、初期上体鉛直位置速度（ $Z_0$ ,  $V_{z0}$ ）が今回歩容支持脚座標系から見た値に変換され、これが（ $Z_0''$ ,  $V_{z0}''$ ）として求められる。

補足すると、（ $Z_0''$ ,  $V_{z0}''$ ）は、第 2 旋回歩容の支持脚座標系  
15 （図 1 7 の  $X''$ ,  $Y''$ ,  $Z''$  座標系）から見た第 2 旋回歩容終端上体鉛直位置速度に一致している。また、 $q''[0]$  も第 2 旋回歩容の支持脚座標系（図 1 7 の  $X''$ ,  $Y''$ ,  $Z''$  座標系）から見た第 2 旋回歩容終端発散成分に一致している。したがって、これらの性質を用いて、（ $Z_0''$ ,  $V_{z0}''$ ）および  $q''[0]$  を算出するようにしても良い。

20 さらに、S 2 2 6 に進み、本来の初期時刻 0（今回歩容の終端時刻）における初期逆位相腕振り角および角速度（ $\theta_{az0}$ ,  $\omega_{az0}$ ）を求め、さらに、これを今回歩容の支持脚座標系から見た値である（ $\theta_{az0}''$ ,  $\omega_{az0}''$ ）を求める。具体的には、（ $\theta_{az0}$ ,  $\omega_{az0}$ ）は、S 3 1 4 および S 3 1 6 において決定された逆位相腕振り復元角加速度パターン、定常歩容の初期  
25 （時刻  $T_s$ ）逆位相腕振り角および角速度とを基に、歩容の条件を満足するように歩容を生成した場合における（より具体的には、上体姿勢

## 114

角・逆位相腕振り角復元期間以外では、床反力モーメント鉛直成分が許容範囲を越えないように、逆位相腕振り角軌道を決定し、上体姿勢角・逆位相腕振り角復元期間では、前記基準逆位相腕振り角加速度  $\beta_{aref}$  と逆位相腕振り復元角加速度  $\beta_{arec}$  の和が発生するように逆位相腕振り角軌道を決定した場合における）第2旋回歩容から第1旋回歩容に切り換わった瞬間の時刻、すなわち、時刻  $k = T_{cyc}$ （時刻  $T_e - T_s$ ）であるときに決定される逆位相腕振り角および角速度を、時刻  $T_{cyc}$  から始まる一步（すなわち2度目の第1旋回歩容）の支持脚に対応する支持脚座標系（図17の  $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$ 座標系）から見た値に変換した値に決定される。

以上により、図13のS024の処理、すなわち定常歩容の初期状態を求めるサブルーチン処理が終了する。

次いで、図13のS026に進み、今回歩容の歩容パラメータを決定（一部は仮決定）する。S026では、より具体的には、図39に示すフローチャートに従って、以下の処理が行われる。

まず、S600において、今回歩容の足平位置姿勢軌道が定常歩容の足平位置姿勢軌道につながるように、今回歩容の足平軌道パラメータが設定される。

具体的には、今回歩容初期遊脚足平位置姿勢（今回歩容遊脚足平位置姿勢の初期値）は、今回歩容支持脚座標系から見た現在遊脚位置姿勢（前回歩容終端遊脚位置姿勢）に設定される。今回歩容初期支持脚足平位置姿勢（今回歩容支持脚足平位置姿勢の初期値）は、今回歩容支持脚座標系から見た現在支持脚足平位置姿勢（前回歩容終端支持脚足平位置姿勢）に設定される。また、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩容支持脚座標系から見た次回歩容支持脚座標系（今回歩容に係わる1歩目の遊脚着床位置姿勢の要求値）に対応して決定される。すなわち、今

回歩容終端遊脚足平位置姿勢から遊脚足平 2 2 を床に接触させたまま、すべらないように該足平 2 2 をその底面のほぼ全面が接地するまで回転させたときの、該足平 2 2 の代表点が今回歩容支持脚座標系から見た次回歩容支持脚座標系の原点に合致するように今回歩容終端遊脚足平位置  
5 姿勢が決定される。

今回歩容終端では、支持脚足平 2 2 は離床して空中にある。支持脚足平 2 2 が離床してから後の軌道を決定するために、支持脚足平着地予定位置姿勢を設定する。支持脚足平着地予定位置姿勢は、今回歩容支持脚座標から見た次次回歩容支持脚座標（今回歩容に係わる 2 歩目の遊脚足  
10 平位置姿勢の要求値）に対応して設定される。より具体的には、支持脚足平着地予定位置姿勢は、その位置姿勢から、足平 2 2 を床に接触させたまま、すべらないように該足平 2 2 をその底面のほぼ全面が床に接地するまで回転させたときの該足平 2 2 の代表点が今回歩容支持脚座標から見た次次回歩容支持脚座標の原点に合致するように設定される。

15 今回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、現在支持脚位置姿勢（今回歩容初期支持脚足平位置姿勢）から、次回歩容支持脚座標系に対応する足平着地予定位置姿勢（前記要求パラメータにおける 2 歩目の遊脚側足平着地位置姿勢の要求値）に至る足平位置姿勢軌道を、今回歩容終端まで前記有限時間整定フィルタにより生成することにより求められる。

20 次いで、S 6 0 2 に進み、今回歩容の基準上体姿勢軌道パラメータが、定常歩容の第 1 旋回歩容や第 2 旋回歩容と同様に決定される。ただし、今回歩容の基準上体姿勢軌道が前記定常歩容の基準上体姿勢軌道に連続してつながる（今回歩容終端での基準上体姿勢角及び角速度がそれぞれ定常歩容初期の基準上体姿勢角及び角速度に一致する）ように上記パラ  
25 メータが設定される。なお、本参考例では、傾斜角に関する基準上体姿勢は、今回歩容及び定常歩容のいずれでも定常的な鉛直姿勢である。

次いで、S 6 0 4に進み、今回歩容の基準腕姿勢軌道パラメータが、定常歩容の第1旋回歩容や第2旋回歩容と同様に決定される。ただし、今回歩容の初期基準腕姿勢およびその変化率が基準腕姿勢および変化率の現在瞬間値に一致し、かつ、今回歩容の腕姿勢軌道が前記定常歩容の腕姿勢軌道に連続してつながるように上記パラメータを設定する。なお、ここで決定される腕姿勢軌道パラメータは、定常歩容パラメータの決定（図15のS 1 0 4）の場合と同様、たとえば、両腕体5，5の全体の重心位置（上体3に対する相対位置）、左右の手先（両腕体5，5の先端）の左右方向の間隔および逆位相腕振り角に関するパラメータが決定される。尚、本参考例では、両腕体5，5の全体の重心位置は、上体3に対して一定に維持されるように設定される。

次いで、S 6 0 6に進み、今回歩容の床反力鉛直成分軌道パラメータが、定常歩容の第1旋回歩容や第2旋回歩容と同様、該パラメータにより規定される床反力鉛直成分軌道が前記図6のように実質的に連続な（値がステップ状に飛ばない）軌道になるように設定される。

ただし、床反力鉛直成分軌道パラメータは、今回歩容の全体重心鉛直位置速度と床反力鉛直成分軌道とのいずれもが、前記定常歩容と連続してつながるように決定される。

具体的には、まず、前記図13のS 0 2 4の処理（定常歩容初期状態の決定処理）で最終的に求めた定常歩容の初期上体鉛直位置速度を今回歩容支持脚座標系から見た値に変換した値（ $Z_0''$ ， $V_{z0}''$ ）、すなわち、図23のS 2 2 4で求めた（ $Z_0''$ ， $V_{z0}''$ ）等を基に、例えば前記式04（あるいはロボット1のキネマティクスモデル）を用いて、今回歩容支持脚座標系から見た定常歩容の初期全体重心鉛直位置速度が求められる。具体的には、今回歩容支持脚座標系から見た定常歩容の初期全体重心鉛直位置は、S 2 2 4で求めた定常歩容の上体鉛直位置  $Z_0''$



に対応する図 12 のモデルの上体質点鉛直位置と、定常歩容初期の各足平位置を今回歩容支持脚座標系から見た値に変換したものに対応する支持脚側及び遊脚側の脚体質点鉛直位置とを式 04 に代入することで求められる。また、今回歩容支持脚座標系から見た定常歩容の初期全体重心鉛直速度は、S224 で求めた定常歩容の上体鉛直速度  $V_{z0}$  に対応する図 12 のモデルの上体質点鉛直速度と、定常歩容初期の各足平鉛直速度を今回歩容支持脚座標系から見た値に変換したものに対応する支持脚側及び遊脚側の脚体質点鉛直速度とを式 04 の両辺を微分してなる式に代入することにより求められる。なお、この初期全体重心鉛直位置速度の算出は、より厳密なモデルを用いて行なうようにしてもよい。

そして、このようにして求めた定常歩容の初期全体重心鉛直位置速度を、次式 41a、41b の終端全体重心鉛直位置速度に代入すると共に、前回の目標歩容瞬時値（より厳密には、前回目標歩容の終端状態を今回支持脚座標系に変換したもの）の全体重心鉛直位置および速度を、式 41a、41b の初期全体重心鉛直位置および速度に代入し、式 41a、41b の関係を満足するように、今回歩容の床反力鉛直成分パターン（より具体的にはパラメータ値）が決定される。ただし、式 41a、41b における積分値は今回歩容の初期から終端までの期間の積分値とする。

20

$$\begin{aligned}
 & \text{終端全体重心鉛直位置} - \text{初期全体重心鉛直位置} \\
 & = (\text{床反力鉛直成分} / \text{ロボットの全体質量}) \text{の 2 階積分} \\
 & + \text{重力加速度の 2 階積分} \\
 & + \text{初期全体重心鉛直速度} * 1 \text{ 歩の時間}
 \end{aligned}$$

25

…式 41a

$$\text{終端全体重心鉛直速度} - \text{初期全体重心鉛直速度}$$

＝（床反力鉛直成分/ロボットの全体質量）の1階積分  
 ＋重力加速度の1階積分

…式 4 1 b

ただし、重力加速度は負の値とする。

- 5 より具体的には、まず、図6のような床反力鉛直成分パターンを規定する床反力鉛直成分パラメータ（折れ点の時刻等）のうちの、少なくとも2つのパラメータを独立な未知変数として、その未知変数の値を、式4 1 a、4 1 bからなる連立方程式を解いて決定する。

- 10 未知変数とする床反力鉛直成分パラメータには、例えば、図6の台形の高さ（床反力鉛直成分のピーク値）と幅（片脚支持期時間）とを選択すれば良い。この場合、図6の台形の両側部分の傾きは今回歩容周期等に応じてあらかじめ定めた値とし、あるいは、片脚支持期から空中期に移行する時刻を除く床反力鉛直成分パターンの折れ点の時刻を今回歩容周期等に応じてあらかじめ定めた値とする。補足すると、未知変数を1  
 15 つとすると、一般的には式4 1 a、4 1 bの連立方程式を満足する解が存在しない。

- 次いで、S 6 0 8に進み、床反力水平成分許容範囲[Fxmin, Fxmax]（具体的には該床反力水平成分許容範囲のパターンを規定するパラメータ）が、定常歩容の第1旋回歩容や第2旋回歩容と同様に設定される。  
 20 たとえば図4 0に示すようなパターンで床反力水平成分許容範囲が設定される。本参考例では、先にS 6 0 6で決定した床反力鉛直成分パターンに応じて前記式1 2に基づいて床反力水平成分許容範囲が設定される。

- 次いで、S 6 1 0に進み、床反力モーメント鉛直成分許容範囲[Mzmin, Mzmax]（具体的には該床反力モーメント鉛直成分許容範囲  
 25 のパターンを規定するパラメータ）が、定常歩容の第1旋回歩容や第2旋回歩容と同様に設定される。たとえば図4 1に示すようなパターンで

床反力モーメント鉛直成分許容範囲が設定される。本参考例では、先に S 6 0 6 で決定した床反力鉛直成分パターンに応じて前記式 1 0 1 2 に基づいて床反力モーメント鉛直成分許容範囲が設定される

次いで、S 6 1 2 に進み、今回歩容の Z M P 軌道（具体的には Z M P 5 軌道を規定するパラメータで、軌道の折れ点の時刻や位置）が、定常歩容の第 1 旋回歩容や第 2 旋回歩容と同様、安定余裕が高くかつ急激な変化をしないように、前記図 7 に示すごとく設定される。ただし、今回歩容の Z M P 軌道が前記定常歩容の Z M P 軌道に連続してつながるように上記パラメータを設定される。つまり、今回歩容終端における Z M P の 10 位置が定常歩容初期の Z M P 位置に一致するように、Z M P 軌道パラメータが決定される。この場合、走行歩容では、片脚支持期における Z M P 軌道の折れ点の時刻や位置の設定の仕方は、前述した定常歩容の Z M P 軌道パラメータの設定の仕方と同様でよい。そして、空中期における目標 Z M P 軌道が、空中期開始時から、定常歩容初期の Z M P 位置まで、 15 直線的に連続して変化するように Z M P 軌道パラメータを設定すればよい。

なお、S 6 1 2 で決定される今回歩容の Z M P 軌道パラメータは、仮決定されただけであり、後述するように修正される。そこで、上記のごとく設定した今回歩容の Z M P 軌道を、以降、今回歩容の仮目標 Z M P 20 軌道と呼ぶこととする。

最後に、S 6 1 4 に進み、上体姿勢角・逆位相腕振り角復元期間  $[T_a, T_b]$  が設定される。上体姿勢角・逆位相腕振り角復元開始時刻  $T_a$  は、定常歩容の第 2 旋回歩容における  $T_m$  に相当し、上体姿勢角・逆位相腕振り角復元終了時刻  $T_b$  は、定常歩容の第 2 旋回歩容における  $T_{s2}$  に相当するものである。これらの時刻  $T_a, T_b$  の設定の仕方は、それぞれ 25  $T_m$  および  $T_{s2}$  の設定の仕方と同様である。

## 120

図13の説明に戻って、上記のごとくS026に示す処理（今回歩容の歩容パラメータ決定処理）を行って後、次いでS028に進み、今回歩容の歩容パラメータ（ZMP軌道パラメータ）が修正され、また、逆位相腕振り角に関するパラメータが決定される。この処理では、上体位置姿勢軌道を定常歩容に連続させ、もしくは近づけるべくZMP軌道パラメータが修正され、かつ、逆位相腕振り角が定常歩容の逆位相腕振り角軌道に収束するように今回歩容の逆位相腕振り角に関するパラメータが決定される。

図42はその処理を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

10 まずS700を経てS702に進み、仮目標ZMPパターンとその他の今回歩容パラメータを基に、今回歩容終端時刻までの仮今回歩容が仮生成される。

S702では、図43に示すフローチャートに従って、以下の処理が行われる。

15 以下説明すると、S800において、諸々の初期化が行われる。具体的には、仮歩容生成用時刻  $k$  に0が代入される。また、前回目標歩容の終端状態（より具体的には、上体水平位置速度、上体鉛直位置速度、上体姿勢角及びその角速度、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの歩容状態の終端値）を今回支持脚座標系に変換したものを、今回歩容初期状態とする。

補足すると、目標腕姿勢は、目標逆位相腕振り角・角速度を含む。

次いで、S802を経てS804において、仮歩容生成用時刻  $k$  が今回歩容終端時刻  $T_{curr}$  以前であるか否か（ $k \leq T_{curr}$  であるか否か）が判断され、その判断結果がYESある場合には、S806の今回歩容  
25 瞬時値決定サブルーチンに進み、今回歩容の時刻  $k$  の瞬時値が決定される。S806の歩容瞬時値決定サブルーチンでは、前述のS306と

## 1 2 1

同様、図 2 5 に示すごとく仮歩容を生成する。ただし、歩容パラメータとして、定常歩容パラメータの代わりに今回歩容パラメータが用いられる。

次いで S 8 0 8 に進み、仮歩容生成用時刻  $k$  が  $\Delta k$  だけ増加され、S 8 0 4 に戻る。

S 8 0 4 の判断結果が NO である場合には、図 4 3 に示すフローチャートの処理が完了する。

以上の処理により、仮の今回歩容が初期から終端まで生成される。

次いで S 7 0 4 に進み、上記のごとく S 7 0 2 で求めた今回歩容終端での上体水平位置速度 ( $X_e$ ,  $V_{xe}$ ) から、終端発散成分  $q_0[k]$  ( $k=T_{curr}$ ) が図示の式 (前記式 1 0) を用いて求められる。

次いで S 7 0 6 に進み、今回歩容終端発散成分  $q_0[k]$  と定常歩容初期発散成分  $q''$  (図 2 3 の S 2 2 4 で求めたもの) との差である終端発散成分誤差  $errq$  が図示の式を用いて求められる。さらに、S 7 0 8 に進んで、その求めた終端発散成分誤差  $errq$  が許容範囲内 (0 近傍の範囲) にあるか否か判断する。

S 7 0 8 の判断結果が NO であるときは S 7 1 0 に進み、 $a = \Delta a$  ( $\Delta a$  は所定の微小量) とし、図 4 4 の関係に従って現在の仮目標 Z M P パターンに台形状の修正を加えた目標 Z M P を基に、前記 S 7 0 2 と同様に、終端までの仮今回歩容を計算する。ここで、図 4 4 を参照して、 $a$  は、今回歩容終端発散成分を定常歩容初期発散成分にできるだけ一致させる (今回歩容の上体水平位置姿勢軌道を定常歩容の上体水平位置姿勢軌道に近づける) ために、仮目標 Z M P を修正するための台形パターンの高さである。この場合、本参考例では、仮目標 Z M P の修正は、支持脚足平 2 2 の底面のほぼ全面が接地する期間 (足底全面接地期間)、すなわち、床反力水平成分許容範囲が十分に広いものとなる期間におい

## 1 2 2

て行なうようにしており、上記台形パターンの折れ点の時刻は、足底全面接地期間における仮目標 Z M P の折れ点の時刻に合わせて設定されている。なお、S 7 1 0 で  $a = \Delta a$  とするのは、現在の仮目標 Z M P 軌道を上記台形パターンによって微小量、修正したときの前記終端発散成分  
5 誤差  $errq$  の変化を観測するためである。

上記のように S 7 1 0 にて、 $a = \Delta a$  として仮目標 Z M P 軌道を修正したときの仮今回歩容を終端まで生成した後、さらに S 7 1 2 に進み、S 7 1 0 で求めた仮今回歩容終端での上体水平位置速度 ( $X e 1$ ,  $V x e 1$ ) を基に、この仮今回歩容における終端発散成分  $q 1[k]$  が図示の式  
10 (前記式 1 0) を用いて求められる。

尚、S 7 1 0 において  $\Delta a$  は、本参考例では、適宜に設定される微小量の定数としたが、以下に説明する繰り返し演算によって終端発散成分誤差  $errq$  が小さくなるにつれて  $\Delta a$  を減少させるように該  $\Delta a$  を設定するようにしても良い。ただし、定数にしてもよい。数回の繰り返し  
15 演算で終端発散成分誤差  $errq$  を許容範囲内に収めることができる。

次いで S 7 1 4 に進み、パラメータ感度  $r$  ( $\Delta a$  に対する終端発散成分誤差の変化の割合) が図示の式から求められる。さらに、S 7 1 6 に進み、 $a = -errq / r$ 、すなわち S 7 0 6 で求めた終端発散成分誤差  $errq$  を、S 7 1 4 で求めたパラメータ感度  $r$  で割った値を高さ  $a$  とする台形パターンの修正量を図 4 4 の関係に従って仮目標 Z M P パターン  
20 に加えることにより、仮目標 Z M P パターンが修正される (新たな仮目標 Z M P パターンが決定される)。

次いで S 7 0 2 に戻る。そして、S 7 0 8 の判断結果が NO である限りは、上記した S 7 0 2 ~ S 7 1 6 の処理が繰り返され、S 7 0 8 の判断結果が YES になったときには、その繰り返しループ (S 7 0 0) を  
25 抜けて S 7 1 8 に進む。

## 1 2 3

S 7 1 8 では、仮今回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角との差、および仮今回歩容の終端上体姿勢角速度と定常歩容の初期上体姿勢角速度との差などを基に、今回歩容の上体姿勢角軌道が定常歩容の上体姿勢角軌道に近づくように、今回歩容の上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 ( Z M P <sub>rec</sub> ) のパターンが決定される。ここで決定する Z M P <sub>rec</sub> は、後述する今回歩容瞬時値の生成処理で、床反力水平成分許容範囲が十分に大きいものとなる期間 ( 片脚支持期内の期間 ) において、上体姿勢角軌道を定常歩容につながらせる ( 近づける ) ように上体姿勢角加速度を発生させても、今回歩容終端発散成分と定常歩容初期発散成分との一致性 ( S 7 0 8 の条件 ) を維持できるように、仮目標 Z M P を修正するためのものである。

この Z M P <sub>rec</sub> は、前記定常歩容生成処理で説明したものと同様に台形状のパターンであり、具体的には次のように決定される。すなわち、図 3 0 における第 2 旋回歩容の期間の Z M P <sub>rec</sub> の台形パターンと同様に、今回歩容の Z M P <sub>rec</sub> の台形パターンを設定し、台形の頂点 ( 折れ点 ) の時刻は既知とする ( より具体的には台形の折れ点の時刻を目標 Z M P の折れ点時刻に合わせる ) と共に、台形高さを未知数とし、以下のように Z M P <sub>rec</sub> の台形高さ ( パラメータ ) が求められる。ただし、Z M P <sub>rec</sub> の台形パターンが立ち上がり始める時刻を T<sub>a</sub> とし、台形パターンから 0 に戻る時刻を T<sub>b</sub> とする。

上記のように上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンの未知パラメータがひとつの場合には、今回歩容の終端において上体姿勢角と上体姿勢角速度の両方を定常歩容に連続につなげることは一般的にはできない。そこで、本参考例では、複数歩に渡って徐々に、生成される歩容の状態が定常歩容の状態に近づけるように、未知パラメータを決定することとする。

## 1 2 4

補足すると、1歩容の中でのZMP<sub>rec</sub>パターンを複雑にし、未知パラメータを2つ以上にして、今回歩容の終端において上体姿勢角と上体姿勢角速度との両者を定常歩容に連続につなげて良いが、ZMP<sub>rec</sub>パターンがジグザグに大きく変動し過ぎる恐れがある。

5 以下では、算出原理を説明した後、算出手順を説明する。

前述のごとくS702でZMP<sub>rec</sub>パターンの台形高さを0として求めた仮今回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角との差を求め、これを $\theta_{err}$ とする。また、仮今回歩容の終端上体姿勢角速度と定常歩容の初期上体姿勢角速度との差を求め、これを $v\theta_{err}$ とする。

10 ここで、ZMP<sub>rec</sub>パターンの台形高さをある値 $b_{curr}$ として今回歩容が生成され、引き続いて、今回歩容と同様のアルゴリズムによって第1巡回歩容が生成されると想定する。ただし、第1巡回歩容の上体姿勢復元モーメントZMP換算値ZMP<sub>rec</sub>パターンは、図24のS310において求められた第1巡回歩容のZMP<sub>rec</sub>パターン（高さが前記  
15  $acyc1$ である図30の台形パターン）とある値 $b1$ の和であるとする。

このようにして生成された歩容をZMP<sub>rec</sub>修正歩容と呼び、その終端（第1巡回歩容の終端）上体姿勢角と角速度をそれぞれ $\theta_1$ 、 $v\theta_1$ とする。

S024における定常歩容の初期状態を求めるサブルーチンの処理が  
20 完了した時点で求められた本来の定常歩容（最終的にS310において決定された定常歩容初期上体姿勢角および角速度を初期値とし、ZMP<sub>rec</sub>パターンをS310において求められたパターン（高さが $acyc1$ である図30の台形パターン）とした場合の定常歩容）の第1巡回歩容終端上体姿勢角と角速度をそれぞれ $\theta_{1org}$ 、 $v\theta_{1org}$ とする。

25 ここで、 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta v\theta_1$ を次のように定義する。



1 2 5

$$\Delta \theta 1 = \theta 1 - \theta 1org \quad \cdots \text{式 } 50$$

$$\Delta v \theta 1 = v \theta 1 - v \theta 1org \quad \cdots \text{式 } 51$$

5  $\Delta \theta 1$  および  $\Delta v \theta 1$  は、ZMPrec 修正歩容と本来の定常歩容を第 1 旋回歩容の終端まで生成した時点において、両者間における上体姿勢角の差及び角速度の差を意味する。もし、 $\Delta \theta 1$  および  $\Delta v \theta 1$  が 0 になれば、ZMPrec 修正歩容に引き続いて、今回歩容と同様のアルゴリズムによって、ZMPrec パターンの台形高さを前記 acyc2 として第 2 旋回歩容が生成されると、この歩容は、本来の定常歩容に一致する。

10 したがって、 $\Delta \theta 1$  および  $\Delta v \theta 1$  が 0 となる今回歩容台形高さ bcurr、第 1 旋回歩容台形高さ b1 を求め、求めた bcurr を今回歩容の台形高さとして最終的に決定すれば良い。

ところで、ロボット 1 の上体姿勢角に関する動力学モデルが図 1 2 に示すフライホイール FHx、FHy のような線形特性を持つことから、  
15  $\Delta \theta 1$  および  $\Delta v \theta 1$  は、今回歩容台形高さ bcurr、第 1 旋回歩容台形高さ b1、仮今回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角の差  $\theta err$ 、仮今回歩容の終端上体姿勢角速度と定常歩容の初期上体姿勢角速度の差  $v \theta err$  と以下の関係を持つ。

$$20 \quad \Delta \theta 1 = c11 * bcurr + c12 * b1 + \theta err + e1 * v \theta err \quad \cdots \text{式 } 52$$

$$\Delta v \theta 1 = c21 * bcurr + c22 * b1 + e2 * v \theta err \quad \cdots \text{式 } 53$$

ただし、c11、c12、c21、c22、e1、e2 は、今回歩容、第 1 旋回歩容の歩容周期、上体姿勢復元モーメント ZMP 換算値 ZMPrec パターンの  
25 パラメータ（特に時間に関するパラメータ）などによって一義的に決定される係数である。

## 1 2 6

以上の原理に基づき、算出手順として、まず、仮今回歩容と定常歩容との境界での上体姿勢角の差  $\theta_{err}$  と角速度の差  $V\theta_{err}$  が求められる。

次いで、式 5 2, 5 3 の係数である  $c11$ 、 $c12$ 、 $c21$ 、 $c22$ 、 $e1$ 、 $e2$  が、今回歩容、第 1 旋回歩容の歩容周期、上体姿勢復元モーメント Z M P 換  
5 算値 Z M P  $_{rec}$  パターンのパラメータ（特に時間に関するパラメータ）などを基に求められる。

次いで式 5 2、式 5 3 の右辺が 0 となるように今回歩容台形高さ  $b_{curr}$ 、第 1 旋回歩容台形高さ  $b1$  が決定される。すなわち、式 5 2、式 5 3 の左辺を 0 とした連立方程式を解くことによって、 $b_{curr}$ 、 $b1$  が  
10 求められる。

最後に、今回歩容の上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値（Z M P  $_{rec}$ ）の台形パターンの台形高さが、上記求めた今回歩容台形高さ  $b_{curr}$  に設定される。

次いで S 7 2 0 に進み、現在の仮目標 Z M P パターン（S 7 0 0 の繰  
15 り返しループを抜けたときの仮目標 Z M P パターン）に、S 7 1 8 で上記のように求めた上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンを加算してなるパターンが今回歩容の目標 Z M P パターンとして決定される。  
なお、この処理は、S 7 1 0 において  $\Delta a$  の高さの台形パターンを仮目標 Z M P パターンに加える処理と同様である。

20 以下に仮目標 Z M P パターンに上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンを加算した理由を述べる。

S 7 0 0 のループにおいて生成される仮今回歩容は、上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 Z M P  $_{rec}$  を 0（Z M P  $_{rec}$  の台形パターンの高さパラメータを 0）にして生成されたものである。このようにして S 7  
25 0 0 のループで最終的に生成された仮今回歩容では、その上体位置速度は、定常歩容に連続し、もしくは近づくが、上体姿勢角は、定常歩容の

上体姿勢角からずれ、場合によっては発散してしまう。

S 7 1 8 で求められた上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンは、上体姿勢角の定常歩容に対するずれを 0 に近づけるための上体姿勢角加速度を発生させるものである。

- 5       しかし、S 7 0 0 のループで最終的に得られた仮目標 Z M P パターンを修正することなく、S 7 1 8 で求められた上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンに応じた上体姿勢角加速度を発生させると、動力学的平衡条件（ロボットの重力と慣性力との合力が目標 Z M P に作用するモーメントが鉛直成分を除いて 0 になること）を満足させるために、上
- 10    体水平位置軌道を前記仮今回歩容の上体水平位置軌道からずらさざるを得なくなる。そこで、本実施例では、上体水平位置軌道を S 7 0 0 のループで最終的に得られるものからずらさなくて済むように、Z M P <sub>rec</sub> によって仮目標 Z M P パターンを修正することとした。

- 前記仮今回歩容の運動に加えて、S 7 1 8 で求めた上体姿勢復元モー
- 15    メント Z M P 換算値パターンに対応する上体姿勢角加速度を発生させると、Z M P （運動によって発生する重力と慣性力の合力の鉛直成分を除くモーメントが 0 になる点）は上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値だけずれる。したがって、逆に、仮目標 Z M P パターンに上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンを加算したパターンを目標 Z M P パター
- 20    ンとして、S 7 1 8 で求めた上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンに対応する上体傾斜モードの上体姿勢角加速度を発生させながら、目標 Z M P パターンを満足する今回歩容を生成すれば、前記仮今回歩容と同じ上体並進運動となる。

- 以上が、仮目標 Z M P パターンに上体姿勢復元モーメント Z M P 換算
- 25    値パターンを加算したパターンを目標 Z M P パターンとした理由である。

      次いで S 7 2 2 に進み、仮今回歩容の終端逆位相腕振り角と定常歩容

の初期逆位相腕振り角との差および仮今回歩容の終端逆位相腕振り角速度と定常歩容の初期逆位相腕振り角速度との差を基に、今回歩容の逆位相腕振り角軌道が定常歩容の逆位相腕振り角軌道に近づくように、逆位相腕振り復元角加速度パターンが決定される。このパターンの決定方法は、S 7 1 8 で上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンを決定する  
5 方法と、変数名が次のように異なること以外は、ほぼ同じである。

上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターン→逆位相腕振り復元角加速度パターン

10 水平成分→モーメント鉛直成分

以下に詳細を説明する。ここで決定する逆位相腕振り復元角加速度パターンは、後述する今回歩容瞬時値の生成処理で、床反力モーメント鉛直成分許容範囲が十分に大きいものとなる期間（片脚支持期内の期間）  
15 において、逆位相腕振り角軌道を定常歩容につながらせる（近づける）ように修正するためのものである。

この逆位相腕振り復元角加速度パターンは、前記定常歩容生成処理で説明したものと同様に台形状のパターンであり、具体的には次のように決定される。すなわち、図 3 6 における第 2 旋回歩容の期間の逆位相腕  
20 振り復元角加速度の台形パターンと同様に、今回歩容の逆位相腕振り復元角加速度の台形パターンを設定し、台形の頂点（折れ点）の時刻は既知とする（より具体的には台形の折れ点の時刻を目標 Z M P の折れ点時刻に合わせる）と共に、台形高さを未知数とし、以下のように逆位相腕  
25 振り復元角加速度の台形パターンが立ち上がり始める時刻を  $T_a$  とし、台形パターンから 0 に戻る時刻を  $T_b$  とする。

上記のように逆位相腕振り復元角加速度パターンの未知パラメータがひとつの場合には、今回歩容の終端において逆位相腕振り角と逆位相腕振り角速度の両方を定常歩容に連続につなげることは一般的にはできない。そこで、本参考例では、複数歩に渡って徐々に、生成される歩容の  
5 状態が定常歩容の状態に近づくように、未知パラメータを決定することとする。

補足すると、1歩容の中での逆位相腕振り復元角加速度パターンを複雑にし、未知パラメータを2つ以上にして、今回歩容の終端において逆位相腕振り角と逆位相腕振り角速度との両者を定常歩容に連続につなげ  
10 ても良いが、逆位相腕振り復元角加速度パターンがジグザグに大きく変動し過ぎる恐れがある。

前述のごとく S 7 0 2 で逆位相腕振り復元角加速度パターンの台形高さを0として求めた仮今回歩容の終端逆位相腕振り角と定常歩容の初期逆位相腕振り角との差を求め、これを  $\theta_{azerr}$  とする。また、仮今回歩  
15 容の終端逆位相腕振り角速度と定常歩容の初期逆位相腕振り角速度との差を求め、これを  $v\theta_{zerr}$  とする。

ここで、逆位相腕振り復元角加速度パターンの台形高さがある値  $bzcurr$  として今回歩容が生成され、引き続いて、今回歩容と同様のアルゴリズムによって第1巡回歩容が生成されると想定する。ただし、第  
20 1巡回歩容の逆位相腕振り復元角加速度パターンは、図24の S 3 1 4 において求められた第1巡回歩容の逆位相腕振り復元角加速度パターン（高さが前記  $azcyc1$  である図36の台形パターン）とある値  $bz1$  の和であるとする。

このようにして生成された歩容を逆位相腕振り復元角加速度修正歩容  
25 と呼び、その終端（第1巡回歩容の終端）逆位相腕振り角と角速度をそれぞれ  $\theta_{z1}$ 、 $v\theta_{z1}$  とする。

## 130

S 0 2 4における定常歩容の初期状態を求めるサブルーチンの処理が完了した時点で求められた本来の定常歩容（最終的にS 3 1 4において決定された定常歩容初期逆位相腕振り角および角速度を初期値とし、逆位相腕振り復元角加速度パターンをS 3 1 4において求められたパターン（高さが azcyc1 である図 3 6 の台形パターン）とした場合の定常歩容）の第 1 巡回歩容終端逆位相腕振り角と角速度をそれぞれ  $\theta_{z1org}$ 、 $v\theta_{z1org}$  とする。

ここで、 $\Delta\theta_{z1}$ 、 $\Delta v\theta_{z1}$  を次のように定義する。

$$10 \quad \Delta\theta_{z1} = \theta_{z1} - \theta_{z1org} \quad \dots \text{式 1 0 5 0}$$

$$\Delta v\theta_{z1} = v\theta_{z1} - v\theta_{z1org} \quad \dots \text{式 1 0 5 1}$$

$\Delta\theta_{z1}$  および  $\Delta v\theta_{z1}$  は、逆位相腕振り復元角加速度修正歩容と本来の定常歩容を第 1 巡回歩容の終端まで生成した時点において、両者間における逆位相腕振り角の差及び角速度の差を意味する。もし、 $\Delta\theta_{z1}$  および  $\Delta v\theta_{z1}$  が 0 になれば、逆位相腕振り復元角加速度修正歩容に引き続いて、今回歩容と同様のアルゴリズムによって、逆位相腕振り復元角加速度パターンの台形高さを前記 azcyc2 として第 2 巡回歩容が生成されると、この歩容は、本来の定常歩容に一致する。

したがって、 $\Delta\theta_{z1}$  および  $\Delta v\theta_{z1}$  が 0 となる今回歩容台形高さ bzcrr、第 1 巡回歩容台形高さ bz1 を求め、求めた bzcrr を今回歩容の台形高さとして最終的に決定すれば良い。

ところで、ロボット 1 の逆位相腕振り角に関する動力学モデルが図 1 2 に示すフライホイール FHaz のような線形特性を持つことから、 $\Delta\theta_{z1}$  および  $\Delta v\theta_{z1}$  は、今回歩容台形高さ bzcrr、第 1 巡回歩容台形高さ bz1、仮今回歩容の終端逆位相腕振り角と定常歩容の初期逆位相腕振り

1 3 1

り角の差  $\theta_{zerr}$ 、仮今回歩容の終端逆位相腕振り角速度と定常歩容の初期逆位相腕振り角速度の差  $v\theta_{zerr}$  と以下の関係を持つ。

$$\Delta \theta_{z1} = cz11 * bzcurr + cz12 * bz1 + \theta_{zerr} + ez1 * v\theta_{zerr}$$

…式 1 0 5 2

5  $\Delta v\theta_{z1} = cz21 * bzcurr + cz22 * bz1 + ez2 * v\theta_{zerr}$

…式 1 0 5 3

ただし、 $cz11$ 、 $cz12$ 、 $cz21$ 、 $cz22$ 、 $ez1$ 、 $ez2$  は、今回歩容、第 1 旋回歩容の歩容周期、逆位相腕振り復元角加速度パターンのパラメータ（特に時間に関するパラメータ）などによって一義的に決定される係数である。

以上の原理に基づき、算出手順として、まず、仮今回歩容と定常歩容との境界での逆位相腕振り角の差  $\theta_{zerr}$  と角速度の差  $v\theta_{zerr}$  が求められる。

15 次いで、式 1 0 5 2、1 0 5 3 の係数である  $cz11$ 、 $cz12$ 、 $cz21$ 、 $cz22$ 、 $ez1$ 、 $ez2$  が、今回歩容、第 1 旋回歩容の歩容周期、逆位相腕振り復元角加速度パターンのパラメータ（特に時間に関するパラメータ）などを基に求められる。

20 次いで式 1 0 5 2、式 1 0 5 3 の右辺が 0 となるように今回歩容台形高さ  $bzcurr$ 、第 1 旋回歩容台形高さ  $bz1$  が決定される。すなわち、式 1 0 5 2、式 1 0 5 3 の左辺を 0 とした連立方程式を解くことによって、 $bzcurr$ 、 $bz1$  が求められる。

最後に、今回歩容の逆位相腕振り復元角加速度の台形パターンの台形高さが、上記求めた今回歩容台形高さ  $bzcurr$  に設定される。

25 図 1 3 に戻って、上記のごとく S 0 2 8 において今回歩容パラメータを修正した後、あるいは S 0 1 6 の判断結果が NO である場合には、S

## 1 3 2

0 3 0に進み、今回歩容瞬時値が決定される。

S 0 3 0では、そのサブルーチンである図 4 5 の処理が実行される。

図 4 5 の S 1 4 0 0 から S 1 4 1 1 までは、図 2 5 の S 4 0 0 から S 4 1 1 までと同一の処理が行なわれ、次に、S 1 4 1 2 のサブルーチン  
5 である図 4 6 の S 1 0 0 0 ~ S 1 0 1 8 の処理が行なわれる。

具体的には、まず S 1 0 0 0 において、目標上体ヨー角に現在時刻での基準上体ヨー角の値を代入する。また、腕姿勢逆位相腕振り角・角速度を除き、目標腕姿勢に現在時刻での基準腕姿勢の値を代入する。

次いで S 1 0 0 2 に進み、現在時刻が、上体姿勢角・逆位相腕振り角  
10 復元期間（時刻  $T_a$  から時刻  $T_b$  の期間）の間にあるか否かが判定される。S 1 0 0 2 の判定結果が NO であるならば、S 1 0 0 4 に進み、YES であるならば S 1 0 0 6 に進む。

S 1 0 0 4 では、上体傾斜角・逆位相腕振り角復元期間でない場合の上体水平加速度  $\alpha$ 、上体角加速度  $\beta$ 、逆位相腕振り角加速度  $\beta_a$  算出処理（図 2 6 の S 5 0 4 から S 5 2 8）と同様の処理を行う。  
15

S 1 0 0 6 に進む場合では、まず、S 1 0 0 6 において、仮に上体並進モードの運動をさせた場合に今回（時刻  $k$ ）目標 ZMP を満足するために必要な上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を求める。

次いで S 1 0 0 8 に進み、現在時刻における上体傾斜復元モーメント  
20 ZMP 換算値パターンの瞬間値  $ZMP_{rec}$  を、S 7 1 8 において決定した上体傾斜復元モーメント ZMP 換算値パターンに関するパラメータを基に算出する。

次いで S 1 0 1 0 に進み、現在時刻における逆位相腕振り復元角加速度パターンの瞬間値  $\beta_{arec}$  を、S 7 2 2 において決定した逆位相腕振り復元角加速度パターンに関するパラメータを基に算出する。  
25

次いで S 1 0 1 2 に進み、図示する式によって、上体傾斜モードの上



## 1 3 3

体角加速度（上体傾斜角加速度） $\beta$ が決定される。

次いでS 1 0 1 4に進み、図示する式によって、上体水平加速度 $\alpha$ が決定される。

次いでS 1 0 1 6に進み、S 1 0 1 0で算出した逆位相腕振り復元角  
5 加速度パターンの瞬間値 $\beta_{arec}$ と基準逆位相腕振り角加速度 $\beta_{aref}$   
（基準逆位相腕振り角を2階微分した値）の和を目標逆位相腕振り角加  
速度 $\beta_a$ に代入する。

次いでS 1 0 1 8に進み、上体水平加速度が $\alpha$ の場合の床反力水平成分 $F_x$ を求める。

10 次いでS 1 4 1 4に進み、上体水平加速度と上体姿勢角加速度を積分  
して上体水平速度と上体姿勢角速度（上体傾斜角速度）を算出する。こ  
れをさらに積分して、上体水平位置と上体姿勢（上体傾斜角）を決定す  
る。なお、上体姿勢のうちの上体ヨー角は、本参考例では基準上体ヨー  
角に決定される。

15 次いでS 1 4 1 6に進み、逆位相腕振り加速度を積分して逆位相腕振  
り角速度を算出する。これをさらに積分して、逆位相腕振り角を決定す  
る。

以上のごとく、図13のS 0 3 0の処理が完了する。

次いでS 0 3 2に進み、歩容生成用時刻 $t$ を $\Delta t$ だけ増やし、S 0 1  
20 4に戻り、以上のごとく歩容生成を続ける。

以上が、歩容生成装置100における目標歩容生成処理である。

図4を参照して本参考例に係る装置の動作をさらに説明すると、歩容  
生成装置100において、上記したように目標歩容が生成される。生成  
された目標歩容のうち、目標上体位置姿勢（軌道）、目標腕姿勢（軌  
25 道）が、ロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）102に送  
出される。

## 1 3 4

また、目標足平位置姿勢（軌道）、目標 Z M P 軌道（目標全床反力中心点軌道）、および目標全床反力（軌道）（目標床反力水平成分と目標床反力鉛直成分）は、複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に送られると共に、目標床反力分配器 1 0 6 にも送られる。そして、目標床反力分配器 1 0 6 で、床反力は各足平 2 2 R, 2 2 L に分配され、目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力が決定される。この決定された目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力は複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に送られる。

複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 から、機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）がロボット幾何学モデル 1 0 2 に送られる。ロボット幾何学モデル 1 0 2 は、目標上体位置姿勢（軌道）と機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を入力されると、それらを満足する脚体 2, 2 の 1 2 個の関節（1 0 R（L）など）の関節変位指令（値）を算出して変位コントローラ 1 0 8 に送る。変位コントローラ 1 0 8 は、ロボット幾何学モデル 1 0 2 で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット 1 の 1 2 個の関節の変位を追従制御する。また、ロボット幾何学モデル 1 0 2 は、目標腕姿勢を満足する腕関節の変位指定（値）を算出して変位コントローラ 1 0 8 に送る。変位コントローラ 1 0 8 は、ロボット幾何学モデル 1 0 2 で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット 1 の腕体の 1 2 個の関節の変位を追従制御する。

ロボット 1 に生じた床反力（詳しくは実各足床反力）は 6 軸力センサ 5 0 によって検出される。その検出値は前記複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に送られる。

また、ロボット 1 に生じた実上体姿勢角偏差（目標上体姿勢と実上体姿勢（上体 3 の実際の姿勢）との偏差）のうちの姿勢傾斜角偏差  $\theta_{errx}$ ,

## 135

$\theta_{erry}$ （詳しくは目標上体姿勢のうちの鉛直方向に対する傾斜角に対する実上体姿勢のうちの鉛直方向に対する傾斜角の偏差で、ロール方向（X軸回り）の姿勢傾斜角偏差が $\theta_{errx}$ であり、ピッチ方向（Y軸回り）の姿勢傾斜角偏差が $\theta_{erry}$ である）が姿勢センサ54を介して検出され、その検出値は姿勢傾斜安定化制御演算部112に送られる。この姿勢傾斜安定化制御演算部112で、ロボット1の実上体姿勢角を目標上体姿勢角に復元するための目標全床反力中心点（目標ZMP）まわり補償全床反力モーメント水平成分が算出されて複合コンプライアンス動作決定部104に送られる。

10 より具体的には、本参考例では、補償全床反力モーメント水平成分 $M_{dmdxy}$ は、例えばPD制御則を用いて次式により決定される。

補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$

$= K_{\theta b} * \text{上体姿勢傾斜角偏差}$

15  $+ K_{\omega b} * \text{上体姿勢傾斜角速度偏差}$

..... d 25

ここで、 $K_{\theta b}$ 、 $K_{\omega b}$ は所定のゲインである。また、上体姿勢傾斜角速度偏差は、上体姿勢傾斜角偏差の時間微分値であり、目標上体姿勢傾斜角速度に対する実上体姿勢傾斜角速度の偏差を意味する。また、上体姿勢傾斜角偏差は、より詳しくは、ロボット1の上体3のロール方向（X軸回り）の姿勢傾斜角偏差と、ピッチ方向（Y軸回り）の姿勢傾斜角偏差とからなるベクトルである。

また、ロボット1に生じた前記実上体姿勢角偏差のうちのヨー角偏差 $\theta_{errz}$ （詳しくは実上体姿勢角偏差のうちのヨー方向（Z軸回り）の姿勢角偏差が $\theta_{errz}$ である）が姿勢センサ54を介して検出され、その検出値はヨー安定化制御演算部113に送られる。このヨー安定化制御

## 1 3 6

演算部 1 1 3 で、ロボット 1 の実上体ヨー角および／または角速度を目標上体ヨー角および／または角速度に収束させるための目標全床反力中心点（目標 Z M P）まわり補償全床反力モーメント鉛直成分が算出されて複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に送られる。複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 は、入力値に基づいて目標床反力を修正する。具体的には、目標全床反力中心点（目標 Z M P）回りに補償全床反力モーメントが作用するように目標床反力を修正する。

より具体的には、本参考例では、補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  は、例えば P D 制御則を用いて次式により決定される。

10

$$\begin{aligned} \text{補償全床反力モーメント鉛直成分 } M_{dmdz} = & K_{\theta bz} * \text{上体ヨー角偏差} \\ & + K_{\omega bz} * \text{上体ヨー角速度偏差} \\ & \dots\dots d 2 6 \end{aligned}$$

15      ここで、 $K_{\theta bz}$ 、 $K_{\omega bz}$  は所定のゲインである。また、上体ヨー角速度偏差は、上体ヨー角偏差の時間微分値であり、目標上体ヨー角速度に対する実上体ヨー角速度の偏差を意味する。

補足すると、補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  を前記式 d 2 6 により求めるとき、足平 2 2 と床の間の鉛直軸まわり回転滑りまたは鉛直軸まわり回転振動を防止したいだけなら、 $K_{\theta bz}$  を 0 にすれば良い。上体ヨー角偏差までも 0 に近づけようとすると、実床反力モーメント鉛直成分が大きくなる傾向があるからである。

複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 は、入力値に基づいて目標床反力を修正する。具体的には、目標全床反力中心点（目標 Z M P）回りに補償全床反力モーメント水平成分が作用するように目標床反力モーメント水平成分を修正し、さらに、目標歩容に動力学的に釣り合う目標全

25

床反力中心点（目標 Z M P）回りの目標床反力鉛直成分に補償全床反力モーメント鉛直成分を付加的に追加することによって目標床反力モーメント鉛直成分を修正する。

複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 は、修正された目標床反力に、  
5 センサ検出値などから算出される実ロボット 1 の状態および床反力を一致させようと上記機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を決定する。ただしすべての状態を目標に一致させることは事実上不可能であるので、これらの間にトレードオフ関係を与えて妥協的になるべく一致させる。すなわち、各目標に対する制御偏差に重みを与えて、制御偏差（あるいは制御偏差の 2 乗）の重み付き平均が最小になるように制御  
10 する。これにより、実際の足平位置姿勢と全床反力とが目標足平位置姿勢と目標全床反力とに概ね従うように制御される。

尚、この発明の要旨は歩容生成装置 1 0 0 におけるロボット 1 の歩容生成にあり、上記した複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 などの構成  
15 および動作は、本出願人が先に出願した特開平 1 1 - 3 0 0 6 6 1 号公報などに詳細に記載されているので、説明を以上に留める。

S 0 2 8 において、今回歩容パラメータは、前述のごとく、今回歩容の終端発散成分が、定常巡回歩容の初期発散成分  $q[0]$  を今回歩容の支持脚座標系から見た値である  $q''$  に一致するように修正される。

20 実は、発散成分とは、動力学モデルを用いて今回歩容パラメータに従って歩容を生成し、そのまま連続して定常巡回歩容パラメータに従って歩容を繰り返し生成したとき、生成した歩容の上体水平位置が定常巡回歩容に収束するか否かを評価する指標である。収束する場合にちょうど、今回歩容の終端発散成分が、定常巡回初期発散成分  $q[0]$  を今回歩容  
25 の支持脚座標系から見た値である  $q''$  に一致するように、本来、発散成分は定義されなければならない。

式10で定義した発散成分は、実は、上記の性質を近似的に満足する発散成分である。

したがって、本参考例においては、動力学モデルを用いて今回歩容パラメータに従って歩容を生成し、そのまま連続して定常旋回歩容パラメータに従って歩容を繰り返し生成したとき、生成した歩容の上体水平位置が定常旋回歩容の上体水平位置に収束する（近づく）ように、今回歩容パラメータを修正した、と言える。

これは、PCT公開公報 WO/02/40224 のものと同様である。

特に、本参考例においては、その条件（今回歩容が定常歩容に近づく）を満足するように、今回歩容の歩容パラメータのうちの目標ZMPパターンを修正するようにした。図47を参照して説明すると、同図に符合Bで示す軌道は、上記したように歩容の境界において発散成分が一致するように生成した上体水平位置軌道を示す。

同図に符合Aで示す軌道は、定常旋回歩容との境界における上体水平位置速度が一致するように今回歩容を生成し、続いて定常歩容を繰り返し生成した場合の上体水平位置軌道を示す。

図示の如く、符合Bで示す軌道は、今回歩容と最初の定常旋回歩容との境界においては、一般的に符合Aで示す軌道からずれているが、その後、徐々に符合Aで示す軌道に収束し（近づき）、次の定常旋回歩容時期において符合Aで示す軌道にほぼ一致する。このように、歩容境界で発散成分のみを一致させる歩容生成手法でも、歩容境界で位置速度両方を一致させる歩容生成手法と同様、歩容の発散を防止することができる。尚、同図に符合Cで示す例は、それらを考慮せずに軌道を生成した場合の例を示す。このような場合は、生成した軌道は経時的に発散してしまう。当然、目標ZMPパターンを複雑なものにし、複数のパラメータを調整して、位置速度両方を一致させても良いが、目標ZMPパターンが

ジグザグになる恐れがある。なお、位置速度両方を一致させれば、発散成分も一致するから、位置速度両方を一致させる方法も発散成分を一致させる方法の特殊例であると言える。

またさらに、本参考例においては、動力学モデルを用いて今回歩容パラメータに従って歩容を生成し、そのまま連続して定常旋回歩容パラメータに従って歩容を繰り返し生成したとき、生成した歩容の上体姿勢角が定常旋回歩容の上体姿勢角に収束し（近づき）、もしくは一致するように、今回歩容パラメータを修正した、と言える。但し、厳密には、今回歩容直後の第1旋回歩容だけは、前記の如く求めた第1旋回歩容台形高さ  $b1$ ,  $bz1$  によって修正された歩容にする必要がある。別の言い方をすれば、今回歩容と第1旋回歩容とを合わせた歩容を今回歩容と見なせば、本参考例においては、上記の如く歩容を繰り返し生成したとき、生成した歩容の上体姿勢角が第2旋回歩容と第1旋回歩容とからなる定常歩容の上体姿勢角に収束し（近づき）、もしくは一致するように、今回歩容パラメータを修正した、と言える。

次に、本参考例の変形態様を以下にいくつか説明する。なお、以下に説明する変形態様は、後述の各実施形態においても同様である。

本参考例では、理解を容易にするために、床反力水平成分許容範囲は、前後方向（X 軸方向）成分と左右方向（Y 軸方向）成分それぞれ独立に設定できることとしたが、前後方向と左右方向の関係式で表した方が、よりスリップし難い歩容が生成される。

例えば、次式のようにいわゆる摩擦円を許容範囲としても良い。

$$\begin{aligned} & (\text{床反力水平成分の X 成分}) * (\text{床反力水平成分の X 成分}) \\ & + (\text{床反力水平成分の Y 成分}) * (\text{床反力水平成分の Y 成分}) \\ & \leq (k_a * \mu * F_z) * (k_a * \mu * F_z) \end{aligned}$$

ただし、 $F_z$  は、目標床反力鉛直成分を  $\mu$  は摩擦係数、 $k_a$  は 1 以下の正の定数を表す。

ただし、以上のように、床反力水平成分許容範囲を前後方向と左右方向の関係式で表す場合、許容範囲を同時にあるいは交互に満足するように、サジタルプレーン上での運動とラテラルプレーン上での運動を同時にあるいは交互に求める必要がある。

また、床反力水平成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分許容範囲とを上記のごとく別々に設定する代わりに、床反力水平成分と床反力モーメント鉛直成分との組の許容範囲を設定するようにしても良い。床反力水平成分が大きくなるにつれ、床反力モーメント鉛直成分の摩擦限界は、小さくなる。また、床反力モーメント鉛直成分が大きくなるにつれ、床反力水平成分の摩擦限界は、小さくなる。したがって、このことを鑑みて床反力水平成分と床反力モーメント鉛直成分との組の許容範囲を設定するようにした方が、より現実の摩擦限界特性に近い許容範囲を設定することができる。具体的には、床反力水平成分の絶対値と床反力モーメント鉛直成分の絶対値との重み付き平均に対して許容範囲を設定しても良い。

前記参考例では、床反力水平成分と目標 ZMP まわりの床反力モーメント水平成分を適切な値にするために、上体傾斜モードと上体並進モードとの 2 つの運動モードを用いたが、これら以外の運動モードを用いても良い。

例えば、図 48 のように、股関節を中心に上体姿勢を回転させると、全体重心まわりの角運動量が変わると共に全体重心も変化する。この運動と前記上体並進モードをある所定の割合で重ね合わせると（合成すると）、前記上体傾斜モードとほとんど同じ運動になり、床反力水平成



分が発生しなくなる。したがって、これを改めて前記上体傾斜モードとみなせば、本参考例のアルゴリズムにしたがって、同様の歩容を生成することができる。

したがって、運動モードのひとつが床反力水平成分を発生しない運動  
5 モードである必要もない。いかなるモードの組み合わせであっても、床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメントとの発生の割合が異なるふたつの運動モードを用いさえすれば、上記例のように、任意の床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメントとを発生させることができるからである。

10 また、上体姿勢を変化させる運動モード以外の運動モードを用いても良い。ただし、なるべく小さい変位で大きな床反力水平成分または目標ZMPまわりの床反力モーメントが発生できる運動モードを選ぶことが好ましい。

例えば、左右の腕体の先端位置を同一方向に振りまわす運動モード、  
15 接地していない（空中に存在する）足平の位置を振動させる運動モードでも良い。ただし、遊脚軌道を振動させる場合には、着地位置が変わらないように着地直前までには、振動量を実質的に0に戻すべきである。なお、左右の腕体の先端位置を同一方向に振りまわす運動モードと逆位相腕振りモードとを併用してもよいことはもちろんである。

20 また、3つ以上の運動モードを用いても良い。

また、選択した運動モードのうちの少なくとも2つは、その運動モードによる床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメントとの発生比率が、互いに異なるものである必要がある。そうでないと、一般的に連立方程式の解がなくなる（各運動モードの挙動を一義的に決定でき  
25 ない）からである。

さらにできる限り、床反力水平成分をあまり変化させないで目標ZM

Pまわりの床反力モーメントを十分に大きく変化させることができる運動モードと、目標ZMPまわりの床反力モーメントをあまり変化させないで床反力水平成分を十分に大きく変化させることができる運動モードとを組み合わせることが望ましい。

- 5      言いかえると、全体重心をあまり変化させないで角運動量を十分に大きく変化させることができる運動モードと、角運動量をあまり変化させないで全体重心を十分に大きく変化させることができる運動モードとを組み合わせることが望ましい。このようにすると、運動モードの変位が小さくなるからである。
- 10      また、床反力モーメント鉛直成分が許容範囲を越えないようにするために（スピン力をキャンセルするために）、逆位相腕振りモードの代わりに、上体ヨー回転モードを用いても良い。上体ヨー回転モードを用いる場合には、ロボット1の上体3を腰寄りの部分（例えば図1の54の部材の下側の部分）とその上側の部分（例えば図1の54の部材の上側の部分）とに分割し、上側の部分が腰寄りの部分に対してヨー方向に（例えば上体3の体幹軸回り）に回転し得るように設けておくことが好ましい。このようにすると、脚体2, 2の姿勢に影響を及ぼすことなく、上体3の上側の部分を回転させて、床反力モーメント鉛直成分を調整することができる。このようにした場合の参考例は、例えば前記参考例で
- 15      逆位相腕振り角、その角速度およびその角加速度を決定する代わりに、上体3の上側の部分の回転角、その角速度およびその角加速度を決定するようにすればよい。この場合、両腕体5, 5は、例えば上体3の上側の部分に対する相対位置を一定とすればよい。但し、上体3の上側の部分のヨー回転に加えて、両腕体5, 5の逆位相腕振り動作を加えてもよい
- 20      ことはもちろんである。
- 25

また、床反力モーメント鉛直成分が発生するものであれば、腕、上体

## 1 4 3

以外の部位を変位させる運動モードを用いても良い。

例えば、空中期において、両脚先端を前後逆方向に動かすモードを用いても良い。

あるいは、床反力モーメント鉛直成分が発生するいくつかの運動モードを併用しても良い。例えば、逆位相腕振りモードと上体ヨー回転モードを併用しても良い。

また、上体ヨー回転モードおよび逆位相腕振りモードは、全体重心位置が変わらないように（言い換えると床反力水平成分を発生させずに）床反力モーメント鉛直成分を発生させるモードであるが、全体重心位置が変わってしまう（言い換えると床反力水平成分を発生してしまう）運動でも良い。上体並進モードと組み合わせることにより、床反力水平成分を調整することができるからである。

前記参考例に用いた動力学モデル（図 1 2 の動力学モデル）以外にも以下のモデルを用いても良い。

1) 図 4 9 に示したように複数のリンクに質点を設定した非線形なモデル（多質点モデル）。このモデルの各リンクには、イナーシャ（慣性モーメント）が設定されていてもよい。

2) 本願出願人による P C T 公開公報 WO/02/40224 に示された 3 質点モデル

3) 上体ヨー回転モードあるいは逆位相腕振りモードによって生じる慣性力のモーメントを無視したモデル。

4) 重力と慣性力との合力（またはこれと釣り合う床反力）と上体並進運動との関係を表す部分モデルと、上記合力と上体姿勢回転運動（上体傾斜運動と上体ヨー回転運動）の関係を表す部分モデルとを分離して持つ分離型モデル。例えば、図 1 2 に示す質点は、上記合力と上体並進運動との関係を表す部分モデルであり、図 1 2 に示すフライホイールは、

## 1 4 4

上記合力と上体姿勢回転運動との関係を表す部分モデルである。

なお、上記 1) ~ 4) のいずれの場合でも、慣性力のモーメント鉛直成分を発生させる運動モードは必要である。

また、各処理で用いられるモデルは同一でも良いし、処理に応じて適  
5 宜、モデルを使い分けても良い。例えば、前記定常歩容は今回歩容の終  
端状態を決定するためだけに生成されるものであるので、その定常歩容  
の動力学的な精度に対する要求は、今回歩容に比べて小さい。そこで、  
例えば、今回歩容の生成処理では、図 1 2 の動力学モデル（3 質点＋フ  
ライホイールのモデル）を用いる一方、定常歩容の生成処理（特に図 2  
10 1 の S 4 0 8、S 4 1 2）では、各脚体 2 の質量を無視し、上体 3 に対  
応する上体質点 3 m と、フライホール  $FH_x$ 、 $FH_y$ 、 $FH_z$ 、 $FH_{bz}$  と  
で構成される動力学モデル（図 1 2 のモデルで脚質点 2 m、2 m を除去  
した 1 質点＋フライホイールのモデル）を用いて定常歩容を生成するよ  
うにしてもよい。この場合の定常歩容の生成処理では、前記参考例にお  
15 いて、脚質点 2 m の質量を 0 として前記図 2 5 の S 4 0 8、S 4 1 2 の  
処理を行なうようにすればよい。このようにすると、定常歩容の生成処  
理における演算量を大幅に削減できる。

尚、前記参考例において、ブロック線図、フローチャート、およびア  
ルゴリズムなどは、演算処理順序を変えるなどの等価変形をしても良い。  
20 また、適宜ローパスフィルタを挿入しても良い。

また、前記参考例を 2 足移動ロボットに関して説明してきたが、3 足  
以上の多脚ロボットにも応用することができる。

前記参考例のごとく、探索手法を用いたり、部分的に解析手法を用い  
たりして、定常歩容の初期状態（主に初期上体水平位置速度、初期上体  
25 鉛直位置速度および逆位相腕振り角・角速度のこと）を決定する手法の  
代わりに、あらかじめ、上記手法を用いて様々な定常歩容パラメータに

対して計算しておき、定常歩容パラメータと定常歩容の初期状態との関係をマップ化あるいは近似式化して記憶して置き、実移動時には、マップ化あるいは近似式化された上記関係を基に、定常歩容の初期値を決定しても良い。

- 5      さらには、マップ化あるいは近似式化された上記関係と上記関数  $f$  を合成した関数をマップ化あるいは近似式化して記憶しても良い。すなわち、前記した足平軌道パラメータ、床反力鉛直軌道パラメータ等からなる定常歩容パラメータから、定常歩容の発散成分を直接求める関数をマップ化あるいは近似式化して記憶しても良い。例えば、複数種類の代表的な定常歩容パラメータの組のそれぞれに対して、事前に定常歩容を生成しておき、各組の定常歩容パラメータに対する定常歩容の初期状態（図 1 3 の S 0 2 4 で求めるもの）を求めておき、さらにその各組の定常歩容パラメータと、定常歩容初期状態との関係を表すマップをあらかじめ作成しておく。そして、目標歩容を生成する際に、決定された定常歩容パラメータの組から、上記マップに基づいて選択あるいは補間によって定常歩容初期状態を求めるようにすればよい。このようにすれば、今回歩容の生成毎に、定常歩容を生成する必要がなくなり、目標歩容生成処理の演算量を大幅に削減できる。
- 10
- 15

- 20      定常歩容につなげる（近づける）ための今回歩容の修正方法として、本参考例では、今回歩容の目標 Z M P パラメータを修正したが、それ以外のパラメータを修正しても良い。

- 25      たとえば、今回歩容の遊脚の空中での軌道を変えても良い。また、たとえば、上体水平位置が定常歩容よりも後方にずれてしまいような場合には、遊脚を離床後すばやく前方に移動させて遊脚重心位置を前方にずらす。こうすることにより、目標 Z M P を満足するための上体水平位置は、前方により一層加速せざるを得なくなる。この結果、上体水平位置

## 1 4 6

が今回歩容終端において、より一層前方に移動し、定常歩容に一致させることができる。

また、目標 Z M P パラメータを修正する代わりに、今回歩容の周期を修正しても良い。たとえば、上体水平位置が定常歩容よりも後方にずれてしまいそうな場合には、今回歩容の周期を長くすれば良い。今回歩容の周期を長くことで、上体水平位置が移動する時間が延び、それだけ前方に移動できるからである。

ただし、探索手法によって、上体水平位置等の適正値を決定するときに、目標 Z M P パラメータを修正する場合では、目標 Z M P の修正量にほぼ比例して、今回歩容終端上体水平位置が変化するので、上記適正値の探索回数が少なくて済む。これに対して、遊脚重心軌道や歩容の周期を修正する場合には、その修正に対して、今回歩容終端上体水平位置が、かなり非線形に変化するので、上記適正値の探索により多くの探索回数を要する。

15 定常歩容につなげる（近づける）ための今回歩容の修正方法として、本参考例では、今回歩容の目標 Z M P パラメータを修正した。この方法では、場合によっては、目標 Z M P パラメータの修正量（前記図 3 4 の修正量 a）が過大になることがある。たとえば、その場でホッピングしている歩容からいきなり高速で移動する要求（走行要求）が与えられると、高速の定常歩容（走行の定常歩容）につなげる（近づける）ために、目標 Z M P パラメータは、進行方向に対して後ろに極端に大きくずらす必要が生じる。この場合には、上記したように目標 Z M P パラメータ以外の歩容パラメータも修正することが望ましい。但し、この場合では、実は、急激な加速を要求すること自体に無理があったわけであるから、  
25 要求値自身を修正しても良い。

要求値の修正を行なう場合には、例えば、とりあえず本参考例に示し

た手順に従って、要求（要求パラメータ）を満足する定常歩容を求め、この定常歩容につながるように今回歩容パラメータを決定した時点で、今回歩容の目標 Z M P 軌道の安定余裕が少なくなり過ぎたか否かを判定する。そして、安定余裕が少なくなり過ぎた場合（いわゆる支持多角形から目標 Z M P が外れたり、支持多角形の端部付近に目標 Z M P が位置するような場合）には、要求を修正するようにすれば良い。

または、あらかじめ歩容の加減速度（次回歩容初期速度－今回歩容初期速度）／今回歩容の周期）の許容範囲を設定して置き、要求（歩容周期に関する要求パラメータ）を受けた時点で、該要求に対応する加減速度を求め、その求めた加減速度が許容範囲を越えていたら、許容範囲になるように、要求を修正しても良い。

補足すると、前記  $\Delta M_p$ 、 $\Delta F_p$ 、 $\Delta M_r$ 、 $\Delta F_r$ 、 $\Delta Maz$  および  $\Delta Mbz$  は、上記のごとく単純な動力学モデルを用いる場合には、動力学演算により解析的に求めても良いが、一般的なより複雑な動力学モデルを用いる場合には、上体 3 を上体並進モードで微小量だけ加速または上体傾斜モードで微小量だけ加速させた場合の床反力を求め、加速させなかった場合の床反力との差を求め、この差を上記微小量で割ることによって求めれば良い。

また、あらかじめ標準的な歩容における  $\Delta M_p$ 、 $\Delta F_p$ 、 $\Delta M_r$ 、 $\Delta F_r$ 、 $\Delta Maz$ 、 $\Delta Mbz$  および  $\Delta M_p / \Delta M_r$  などのそれぞれの平均値を求めておいて、それを用いても良い。 $\Delta M_p$ 、 $\Delta F_p$ 、 $\Delta M_r$ 、 $\Delta F_r$ 、 $\Delta Maz$ 、 $\Delta Mbz$  および  $\Delta M_p / \Delta M_r$  は、状態（姿勢とその変化率）によって変わるので、各瞬間の状態ごとに求める方法に較べて、精度は若干低下するが、上記モデルよりも複雑なモデルを用いた場合には、演算量を大幅に低減できる。

今回歩容の逆位相腕振り復元角加速度パターンの台形高さ  $bzcurr$  を

決定する方法として、以下の方法を用いても良い。

前記逆位相腕振り復元角加速度修正歩容（図 4 2 の S 7 2 2 の説明を参照）の今回歩容終端時点での逆位相腕振り角と角速度をそれぞれ  $\theta_{zcrr}$ 、 $v_{\theta_{zcrr}}$  とし、これらと、定常歩容の逆位相腕振り角、角速度との差を  $\Delta \theta_{zcrr}$ 、 $\Delta v_{\theta_{zcrr}}$  とする。

歩容周期をインターバルとし、仮今回歩容の終端逆位相腕振り角、角速度と定常歩容の初期逆位相腕振り角、角速度との差  $\theta_{zcrr}$ 、 $v_{\theta_{zcrr}}$  を前回状態、 $b_{zcrr}$  を入力、 $\Delta \theta_{zcrr}$ 、 $\Delta v_{\theta_{zcrr}}$  を今回状態とする離散系の状態方程式を立てて、 $\Delta \theta_{zcrr}$ 、 $\Delta v_{\theta_{zcrr}}$  を 0 に収束させるように、現代制御理論等を用いてフィードバック則を決定し、これに基づいて  $b_{zcrr}$  を求めても良い。

今回歩容およびまたは定常歩容の逆位相腕振り復元角加速度  $\beta_{arec}$  は、台形パターンとせず、各瞬間において、目標逆位相腕振り角・角速度と基準逆位相腕振り角・角速度との差などを基に、その差が 0 に収束するように、状態フィードバック則などを用いて、各瞬間における逆位相腕振り復元角加速度  $\beta_{arec}$  の値を決定しても良い。

今回歩容の逆位相腕振り復元角加速度  $\beta_{arec}$  は、台形パターンとせず、各瞬間において今回歩容の目標逆位相腕振り角・角速度を基に、これらが第 1 巡回歩容の初期逆位相腕振り角・角速度に近づくように、状態フィードバック則などを用いて、各瞬間における逆位相腕振り復元角加速度  $\beta_{arec}$  を決定しても良い。

斜面移動時（傾斜した床面でロボット 1 を移動させるとき）の歩容生成においては、床反力水平成分許容範囲や全体重心加速度水平成分許容範囲の代わりに、並進床反力の床面平行成分（床面に平行な成分）、すなわち摩擦力の許容範囲、あるいは全体重心加速度の床面平行成分（これは摩擦力に比例する）の許容範囲を設定するようにしてもよい。例え



ば、並進床反力の床面平行成分（摩擦力）の許容範囲を設定する場合に  
関して説明（この説明は全体重心加速度の床面平行成分の許容範囲を設  
定する場合でも同様である）すると、該摩擦力は、床面の水平面に対す  
る傾斜角度  $\theta f$ （ロボット 1 の進行方向に向かって前下がり斜面の場合  
5 を正とする）とすると、次式 7 2 の関係が成立する。従って、前記参考  
例と同様のアルゴリズムに歩容を生成する場合、この式 7 2 の関係を用  
いて、摩擦力許容範囲を床反力水平成分許容範囲に変換することで、該  
床反力水平成分許容範囲を設定するようにすればよい。なお、この場合、  
式 7 2 の床反力鉛直成分には、目標床反力鉛直成分を用いればよい。

10

$$\text{摩擦力} = \text{床反力水平成分} * \cos(\theta f) - \text{床反力鉛直成分} * \sin(\theta f)$$

…式 7 2

また、斜面移動時（傾斜した床面でロボット 1 を移動させるとき）の  
15 歩容生成においては、床反力モーメント鉛直成分は、式 1 0 7 2 によっ  
て床面摩擦力法線方向モーメントに変換することができるので、床反力  
モーメント鉛直成分許容範囲の代わりに、床反力モーメントの床面法線  
方向成分、すなわち床面摩擦力法線方向モーメントの許容範囲の許容範  
囲を設定するようにしてもよい。

20

$$\text{床面摩擦力法線方向モーメント} = \text{床反力モーメント鉛直成分} * \cos(\theta f)$$

…式 1 0 7 2

今回歩容のパラメータ決定は、前記参考例のように前回歩容が完了し  
25 た時点で行う以外に、本願出願人による P C T 公開公報 WO/02/  
40224 に記述されているように、今回歩容の生成途中で、再決定しても

良い。こうすることにより、演算量は増えるが、歩容に対する要求に変更があった時に即応できるからである。

また、歩容の修正（今回歩容パラメータを再決定すること）が、今回制御周期で間に合わない場合には、とりあえず今回は、修正しない歩容  
5 あるいは暫定的に修正した歩容（探索途中の歩容であって、完全には、探索完了条件（歩容境界条件のずれが許容値以内に入っていること）を満足していない歩容）を出力し、次回制御周期までに、あるいは複数制御周期後までに（暫定的でない）適切な修正歩容にしても良い。修正された目標ZMP軌道と目標床反力鉛直成分軌道は連続であり、短時間後  
10 では、これらが急激に変化することはないので、今回歩容の目標ZMP軌道と目標床反力鉛直成分軌道が若干ぎざぎざになるだけで、ほとんど問題はない。

また、前記参考例では、図5の走行歩容を生成する場合を例に採って説明したが、ロボット1の歩行歩容を生成する場合でも、前記参考例と  
15 同様に目標歩容を生成できる。この場合には、例えば前記参考例において、目標床反力鉛直成分を前記図6に示したものに代えて、例えば図50に示すようなパターンで設定すればよい。この例では、床反力鉛直成分軌道は、両脚支持期では床反力鉛直成分の増加側に凸の台形状に設定され、片脚支持期では床反力鉛直成分の減少側に凸の台形状に設定され  
20 る。なお、台形部分の高さC1、C2の設定方法などの詳細は、例えば本願出願人によるPCT公開公報WO/03/057425/A1に詳細に説明されているのでここでの説明は省略する。

25 次に、以上説明した参考例およびその変形態様を基礎として、本発明の第1実施形態を図53～図58を参照して説明する。なお、本実施形

態の説明において、前記参考例と同一構成部分もしくは同一機能部分については前記参考例と同一の参照符号を用いて説明を省略する。特に、本実施形態は、先にも述べたように、前記図 1 ～ 図 3 および図 5 ～ 図 12 を参照して説明した事項は、前記参考例と同一である。

- 5      本実施形態が前記参考例と相違する点の概要を説明すると、本実施形態では、目標上体姿勢角と実上体姿勢角の差である実上体姿勢角偏差（上体 3 の鉛直方向に対する傾き角の偏差およびヨー角の偏差）、及び／又はその変化率を 0 に近づけるために、コンプライアンス制御への目標床反力を操作することに加え、目標歩容も修正するようにした。特に、
- 10    実上体姿勢偏差のうちのヨー角成分及び／又はその角速度に応じて、目標歩容に動力学的に釣り合う（目標歩容の運動の慣性力と重力との合力が目標 Z M P まわりに発生するモーメントの鉛直成分に釣り合う）目標 Z M P まわりの床反力モーメントの鉛直成分も修正するようにした。

本実施形態における制御ユニット 6 0 の機能的構成を表すブロック図を図 5 3 に示す。以下、本実施形態における制御ユニット 6 0 の機能的構成が前記参考例のもの（図 4 のもの）と相違する点を説明する。

- 本実施形態においては、姿勢傾斜安定化制御演算部 1 1 2 において算出される補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  は、補償全床反力モーメント水平成分分配器 1 1 0 に入力される。補償全床反力モーメント水平成分分配器 1 1 0 は、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  を、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分とモデル操作床反力モーメント水平成分とに分配する。換言すれば、実上体姿勢傾斜角偏差を基に、姿勢傾斜安定化制御演算部 1 1 2 及び補償全床反力モーメント水平成分分配器 1 1 0 により、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分とモデル操作床反力モーメント水平成分とが決定される。
- 20
- 25

## 152

具体的には、補償全床反力モーメント水平成分分配器 110 においては、まず、モデル操作床反力モーメント水平成分が次式で決定される。なお、床反力モーメント水平成分許容範囲は、後述するごとく歩容生成装置 100 において決定される。

5  $M_{dmdxy} > \text{床反力モーメント水平成分許容範囲上限値である場合}$

モデル操作床反力モーメント水平成分  $= -M_{dmdxy}$

+ 床反力モーメント水平成分許容範囲上限値

$M_{dmdxy} < \text{床反力モーメント水平成分許容範囲下限値である場合}$

モデル操作床反力モーメント水平成分  $= -M_{dmdxy}$

10 + 床反力モーメント水平成分許容範囲下限値

床反力モーメント水平成分許容範囲下限値  $\leq M_{dmdxy}$ 、且つ、  
 $M_{dmdxy} \leq \text{床反力モーメント水平成分許容範囲上限値である場合}$

モデル操作床反力モーメント水平成分  $= 0$

……式 d 2 7 a

15 次に、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分が次式で決定される。

コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分

$= M_{dmdxy} + \text{モデル操作床反力モーメント水平成分}$

……式 d 2 7 b

20 従って、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分とモデル操作床反力モーメント水平成分との差が  $M_{dmdxy}$  に等しくなるようにそれらの床反力モーメント水平成分が決定される。

上記のような演算を行なう補償全床反力モーメント水平成分分配器 110 をブロック図で表すと、図 54 に示すようになる。

25 また、ヨー安定化制御演算部 113 において前記参考例と同様に決定された補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  (前記式 d 2 6 を参

照) は、モデル操作床反力モーメント鉛直成分決定器 1 1 1 に入力される。モデル操作床反力モーメント鉛直成分決定器 1 1 1 は、補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  を基に、モデル操作床反力モーメント鉛直成分を決定する。換言すれば、実上体姿勢角偏差のうちの上体ヨー角  
 5 偏差を基に、ヨー安定化制御演算部 1 1 3 及びモデル操作床反力モーメント鉛直成分決定器 1 1 1 により、補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  とモデル操作床反力モーメント鉛直成分とが決定される。

具体的には、モデル操作床反力モーメント鉛直成分決定器 1 1 1 において、モデル操作床反力モーメント鉛直成分が次式で決定される。なお、  
 10 床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲は、後述するごとく歩容生成装置 1 0 0 において決定される。

$M_{dmdz} > \text{床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲上限値}$ である場合

$$\begin{aligned} \text{モデル操作床反力モーメント鉛直成分} &= -M_{dmdz} \\ &+ \text{床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲上限値} \end{aligned}$$

15

$M_{dmdz} < \text{床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲下限値}$ である場合

$$\begin{aligned} \text{モデル操作床反力モーメント鉛直成分} &= -M_{dmdz} \\ &+ \text{床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲下限値} \end{aligned}$$

20

床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲下限値  $\leq M_{dmdz}$ 、且つ、  
 $M_{dmdz} \leq \text{床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲上限値}$ である場合  
 モデル操作床反力モーメント鉛直成分 = 0

……式 d 2 6 b

上記のような演算を行なうモデル操作床反力モーメント鉛直成分決定  
 25 器 1 1 1 をブロック図で表すと、図 5 5 に示すようになる。従って、モデル操作床反力モーメント鉛直成分は、補償全床反力モーメント鉛直成分

分  $M_{dmdz}$  のうち、床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲を逸脱した分の符号を反転させたものに設定される。

コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分および補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  は、複合コンプライアンス動作決定

5 部 104 に送られる。

モデル操作床反力モーメント水平成分および鉛直成分は、歩容生成装置 100 に送られる。

尚、補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  の代わりに、補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  とモデル操作床反力モーメント鉛直成分との和を、コンプライアンス制御用目標値として、複合コンプライアンス動作決定部 104 に送っても良い。

複合コンプライアンス動作決定部 104 は、歩容生成装置 100 が生成する目標歩容の運動にロボット 1 の運動を追従させつつ、歩容生成装置 100 が生成する目標全床反力にコンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分と補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  を加えることによって修正される目標全床反力に実床反力が近づくように、目標足平位置姿勢を修正することにより、機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を決定する。

この場合、ロボット 1 の足平位置姿勢や床反力の全ての状態を目標に一致させることは事実上不可能であるので、前記参考例と同様、これらの間にトレードオフ関係を与えて妥協的になるべく一致させる。

詳細は後述するが、歩容生成装置 100 は、該歩容生成装置 100 において決定される目標 ZMP まわりの床反力モーメント水平成分がモデル操作床反力モーメント水平成分となるように動力学モデルを用いて目標歩容の運動（特に上体位置姿勢軌道）を生成する。さらに、歩容生成装置 100 は、モデル操作床反力モーメントが 0 であるとして生成され

## 155

た目標歩容（仮目標歩容）に動力的に釣り合う目標全床反力中心点（目標ZMP）回りの目標床反力モーメント鉛直成分にモデル操作床反力モーメント鉛直成分が付加的に発生するように目標歩容の運動（特に腕振り軌道）を修正する。

5      これら以外の、制御ユニット60の機能的構成は、前記参考例と同一である。補足すると、前記参考例で生成した目標歩容は、本実施形態で、前記モデル操作床反力モーメント水平成分と、モデル操作床反力モーメント鉛直成分とを定常的に0に設定した場合に生成される目標歩容と同じである。

10      第1実施形態における歩容生成装置100の動作（歩容生成処理）をそのメインフローチャートである図56を用いて以下に詳説する。S3010からS3028までは、前記参考例の図13のS010からS028と同様の処理を行う。

15      次いで、S3030に進み、コンプライアンス制御用の目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分と床反力モーメント鉛直成分補償量の許容範囲を規定するパラメータが決定される。

20      なお、床反力モーメント水平成分を、床反力鉛直成分で割ったものが、ZMP（床反力中心点）の目標ZMPからのずれ量を表すものとなる。従って、床反力モーメント水平成分許容範囲を、床反力鉛直成分で割ることによって、床反力中心点に変換したZMP許容範囲（床反力中心点許容範囲）のパラメータを設定するようにしてもよい。

25      補足すると、S3030で決定するコンプライアンス制御用の床反力モーメント水平成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲のパラメータとを基に、後述する今回歩容瞬時値決定サブルーチン（S3032のサブルーチン）において、それらの許容範囲の瞬時値が決定され、それが、前記補償全床反力モーメント水平成分分配器110

およびモデル操作床反力モーメント鉛直成分決定器 1 1 1 における前記の処理に用いられる。

この床反力モーメント水平成分許容範囲については、本願出願人による P C T 出願 P C T / J P 0 3 / 0 0 4 3 5 に床反力モーメント許容範囲として設定方法が詳細に記載されているので、本明細書では、これ以上の説明を省略する。

前記床反力モーメント鉛直成分補償量は、歩容生成装置 1 0 0 において、仮に、床反力モーメント鉛直成分が歩容生成用の床反力モーメント鉛直成分許容範囲（これは S 3 0 2 6 において設定される）内に制限された目標歩容を生成した場合に、目標歩容の運動が発生する床反力モーメントに付加することができる床反力モーメント鉛直成分の補償量を意味する。したがって、歩容生成用の床反力モーメント鉛直成分許容範囲が実際の摩擦限界よりも十分に狭く設定されていなければ、床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲を広く設定することはできない。

床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲は、歩容生成用の床反力モーメント鉛直成分許容範囲（前記図 4 1 を参照）と相似形に設定すれば良い。また、前記図 5 の走行歩容の空中期では、コンプライアンス制御用の床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲は、上限値が 0、下限値が 0 の領域に設定される。

図 5 6 に戻って、上記のごとく S 3 0 3 0 においてコンプライアンス制御用の目標 Z M P まわりの床反力モーメント水平成分と床反力モーメント鉛直成分補償量の許容範囲を規定するパラメータを決定した後、あるいは S 3 0 1 6 の判断結果が N O である場合には、S 3 0 3 2 に進み、今回歩容瞬時値が決定される。S 3 0 3 2 では、目標 Z M P まわりに前記式 d 2 7 a に従って決定されるモデル操作床反力モーメント水平成分が発生するように今回歩容瞬時値が決定される。ただし、今回歩容に釣



## 157

り合う（今回歩容の運動の慣性力と重力との合力が目標ZMPまわりに発生する慣性力モーメントの鉛直成分に釣り合う）床反力モーメント鉛直成分が床反力モーメント鉛直成分許容範囲を越えないように今回歩容瞬時値が決定される。

- 5      具体的には、図57、図58のフローチャートにしたがって歩容瞬時値が決定される。すなわち、S3030では、まず、図57のS3400からS3411までの処理が実行される。これらのS3400からS3411までの処理は、前述した図45のS1400からS1411までの処理と全く同一である。
- 10      次いで、S3412に進み、前記図56のS3030で決定したコンプライアンス制御用の床反力モーメント水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分補償量容範囲のパラメータを基に、現在時刻での床反力モーメント水平成分許容範囲[Mxymin, Mxymax]と床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲[Mzcmmin, Mzcmmax]の瞬時値（現在時刻
- 15      tの今回値）が求められる。

求められた床反力モーメント水平成分許容範囲は、前記補償全床反力モーメント水平成分分配器110（図53参照）に送られる。そして、この分配器110で前記式d27aにより算出されたモデル操作床反力モーメントの今回値（現在時刻tの値）が歩容生成装置100に与えられる。

20      。

また、求められた床反力モーメント鉛直成分補償量容範囲は、前記モデル操作床反力モーメント鉛直成分決定器111（図53参照）に送られる。そして、このモデル操作床反力モーメント鉛直成分決定器111で前記式d26bにより算出されたモデル操作床反力モーメント鉛直成分の今回値（現在時刻tの値）が歩容生成装置100に与えられる。

25      。

次いで、歩容生成装置100の処理は、S3414に進み、補償全床

反力モーメント分配器 110 から与えられたモデル操作床反力モーメント水平成分が目標 ZMP まわりに発生するように、今回歩容の上体水平加速度と上体姿勢傾斜角加速とが決定される。ただし、床反力水平成分  $F_x$  が、S3410 で決定された床反力水平成分許容範囲  $[F_{xmin},$

5  $F_{xmax}]$  を越えないように上体水平加速度および上体姿勢角加速度（上体傾斜角加速度）が決定される。

言い換えると、ロボット 1 の運動の慣性力と重力との合力が目標 ZMP まわりに作用するモーメント水平成分がモデル操作床反力モーメント水平成分の符号を反転したモーメントになるように、今回歩容の上体水  
10 平加速度と上体姿勢角加速（上体傾斜角加速度）とが決定される。ただし、慣性力水平成分の符号を反転した力が床反力水平成分許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えないように上体水平加速度および上体姿勢傾斜角加速度が決定される。

S3414 では、具体的には、図 58 に示すフローチャートに従って、  
15 上体水平加速度と上体姿勢角加速度とが決定される。本フローチャートは、S3104 および S3130 を除いて、前記図 26 と同様の処理が行われる。S3104 および S3130 では、図 26 の S504 および S530 と異なり、ロボット 1 の前回瞬時歩容状態（時刻  $k-1$  の歩容状態）から、上体傾斜モードの角加速度を 0 にして（より正確には上体  
20 傾斜モードの角加速度を基準上体姿勢角加速度に一致させて）、上体並進モードの運動をロボット 1 にさせた場合に今回（時刻  $k$ ）の目標 ZMP まわりに前記モデル操作床反力モーメント水平成分が発生するために必要な上体水平加速度（S3104 では  $\alpha_{tmp}$ 、S3130 では  $\alpha$ ）が求められる。

25 これ以外の処理は図 26 の処理と同じである。

以上のごとく S3414 の処理を行った後、S3416 に進み、図 4

5のS 1 4 1 4と同一の処理が実行され、今回歩容の上体水平位置および上体姿勢傾斜角（詳しくはそれらの現在時刻  $t$  における今回値）が決定される。

次いで S 3 4 1 8 に進み、図 4 5 の S 1 4 1 6 と同一の処理が実行され、今回歩容の逆位相腕振り角および角速度（詳しくはそれらの現在時刻  $t$  における今回値）が決定される。

これにより、図 5 6 の S 3 0 3 2 の処理が完了する。

次いで図 5 6 の S 3 0 3 4 に進み、目標 Z M P まわりにモデル操作床反力モーメント鉛直成分が付加的に発生するように、S 3 0 3 2 で生成した今回歩容瞬時値を修正する。

具体的には、モデル操作床反力モーメント鉛直成分に対応する逆位相腕振り角加速度の修正量  $\beta aadd$  を次式によって求める。

逆位相腕振り角加速度の修正量  $\beta aadd$

$$\begin{aligned} 15 \quad &= \text{モデル操作床反力モーメント鉛直成分} \\ &\quad / \text{逆位相腕振り運動の等価慣性モーメント } \Delta M_{az} \end{aligned}$$

さらに、 $\beta aadd$  を制御周期の期間積分して、逆位相腕振り角速度の修正量を求め、さらにこれを積分して逆位相腕振り角の修正量を求める。

最後に、S 3 0 3 2 で生成した今回歩容の逆位相腕振り角および角速度にそれぞれ、逆位相腕振り角速度の修正量および逆位相腕振り角の修正量を加えることにより、今回歩容の逆位相腕振り角および角速度を修正する。

次いで S 3 0 3 6 に進み、時刻  $t$  に制御周期  $\Delta t$  を加え、再び、S 3 0 1 4 に戻り、制御周期毎のタイマー割り込みを待つ。

第 1 実施形態では、以上のごとく、歩容生成装置 1 0 0 における目標

## 160

歩容生成処理が行なわれ、目標上体位置姿勢、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢（逆位相腕振り角を含む）、目標ZMPおよび目標全床反力の瞬時値が逐次決定されて出力される。

5 この場合、目標全床反力は、コンプライアンス制御に必要な成分だけを出力しても良い。なお、目標ZMPは、目標全床反力に含まれるが特に重要であるので、あえて出力として挙げた。また、複合コンプライアンス制御装置（図53の点線で囲った部分）に対しては、モデル操作床反力モーメント水平成分は、目標床反力として出力されない。すなわち、コンプライアンス制御に対しては、目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分が0になることを目標とする目標床反力（本来の意味での目標ZMPを満足する目標床反力）が、歩容生成装置100から出力される。

15 また、複合コンプライアンス制御装置に対しては、S3034において修正された今回歩容の床反力モーメント鉛直成分が目標値として歩容生成装置100から出力される。

20 以上説明した第1実施形態の作用1として、目標歩容の運動は、モデル操作床反力モーメント水平成分が目標ZMPまわりに発生するように生成されつつ、実際のロボット1の床反力は、モデル操作床反力モーメント水平成分が付加されないように制御される。したがって、差し引きモデル操作床反力モーメント水平成分の分だけ、目標歩容の運動と床反力の不平衡（アンバランス）を生じる。このことは、実ロボット1の上体姿勢傾斜角と目標歩容の上体姿勢傾斜角との差を0に収束させる効果に関して言えば、モデル操作床反力モーメント水平成分の符号を反転した床反力モーメント水平成分を実ロボット1に作用させることと等価である。

25 つまり、モデル操作床反力モーメント水平成分を適宜決定することに

より、実ロボット 1 を、修正目標歩容（実ロボット 1 の上体姿勢傾斜角と目標歩容の上体姿勢傾斜角との差を 0 に収束させる歩容）に収束させることができる。つまり、実ロボット 1 の姿勢傾斜を安定化させることができる。

- 5      作用 2 として、モデル操作床反力モーメント水平成分の符号を反転したモーメントとコンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分との和がトータルの傾斜復元力（ロボット 1 の実上体姿勢傾斜角を目標上体姿勢傾斜角に復元させる力）になる。すなわち、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分とモデル操作床反力モーメント水  
10    平成分との差がトータルの姿勢傾斜復元力になる。

また、作用 3 として、モデル操作床反力モーメント水平成分は、ZMP 存在可能範囲を無視していかなる値でも取ることが可能であるので、非常に高い姿勢傾斜復元力を発生することができる。

- また、作用 4 として、床反力水平成分が、床反力水平成分許容範囲を  
15    越えないように上体並進モードの上体並進加速度と上体傾斜モードの上体姿勢傾斜角加速度とが決定されるので、走行歩容における支持脚側脚体 2 の離床直前や着床直後など、大きな床反力水平成分を発生できない時期や、摩擦係数の小さい床をロボット 1 が移動する場合においてもロボット 1 のスリップを防止することができる。

- 20    また、作用 5 として、床反力の並進力鉛直成分が 0 の時期、すなわち、両脚がいずれも接地していない時期では、床反力水平成分の許容範囲が 0 に設定されることにより、前記した第 1 実施形態のアルゴリズムにより自動的に、上体並進モードに依存せずに上体傾斜モードに依存した姿勢傾斜復元が行われ、床と足底の間の摩擦力に依存せずに姿勢復元が行  
25    われる。したがって、この時期（空中期）においても、単に、上体並進モードを修正するだけの方式と異なり、有効に姿勢傾斜復元作用が働く。

## 162

なお、この時には、床反力水平成分が0になるように生成されるから、歩容の全体重心水平加速度は0となる。

また、作用6として、上記したごとく、コンプライアンス制御に対しては、モデル操作床反力モーメント水平成分は、目標床反力として出力  
5 されない。すなわち、目標ZMPまわりにモデル操作床反力モーメント水平成分を発生させるように歩容生成が行なわれても、コンプライアンス制御に対しては、目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分が0になることを目標とする目標床反力が、歩容生成装置100から与えられる。したがって、コンプライアンス制御による床反力制御を妨げず、  
10 コンプライアンス制御による床反力制御を適切に行うことができる。より具体的には、足平22の本来の接地性が低下したり、足平22の底面が浮いてしまうような不具合が発生することを防止または抑制することができる。

なお、後述するように、第2実施形態以降でも、目標ZMPまわりの  
15 コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分は、床反力モーメント水平成分許容範囲を越えないように決定される。

なお、作用1から6は、本願出願人が先に提案したPCT/JP03/00435の技術と同様である。

作用7として、目標歩容の運動は、モデル操作床反力モーメント鉛直  
20 成分が目標ZMPまわりに付加的に発生するように生成されつつ、実際のロボット1の床反力は、歩容生成装置100によりモデル操作床反力モーメント鉛直成分が付加された目標歩容に釣り合う目標床反力モーメント鉛直成分に補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  を加えたものを目標値として、複合コンプライアンス制御により前記目標値に近づく  
25 ように実床反力が制御される。 $M_{dmdz}$  が大きくなってくると、 $M_{dmdz}$  と逆方向のモデル操作床反力モーメント鉛直成分が目標歩容に付加され

ることから、複合コンプライアンス制御により前記目標値に近づくように実床反力を制御するようにしても、実床反力のモーメントの鉛直成分が過大になることがなく、その結果、実ロボット1のスピンを生じることなく、実ロボット1の上体姿勢ヨー角及び／又は上体姿勢ヨー角速度と目標歩容の上体姿勢ヨー角及び／又はヨー角速度との差を0に収束させる効果を奏することができる。

つまり、モデル操作床反力モーメント鉛直成分を適宜決定することにより、実ロボット1を、そのスピンが生じないようにしつつ、修正目標歩容（実ロボット1の上体姿勢ヨー角及び／又は上体姿勢ヨー角速度と目標歩容の上体姿勢ヨー角及び／又は上体姿勢ヨー角速度との差を0に収束させる歩容）に収束させることができる。つまり、実ロボット1のヨー回転を安定化させることができる。

作用8として、補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  がトータルのヨー回転復元力になる。補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  はヨー角偏差および／またはヨー角速度偏差を0に近づけるようにフィードバック制御則に基づき決定されるので、ヨー角偏差の制御的な安定性が保証されつつ、ヨー角偏差および／またはヨー角速度偏差を0に近づけることができる。

また、作用9として、モデル操作床反力モーメント鉛直成分は、床反力モーメント鉛直成分の許容範囲（あるいは摩擦限界）を無視していかなる値でも取ることが可能であるので、非常に高い姿勢ヨー回転復元力を発生することができる。

また、作用10として、コンプライアンス制御に対しては、最終的に目標床反力モーメント鉛直成分が、床反力モーメント鉛直成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲の和の範囲を越えないように決定されるので、走行歩容における支持脚側脚体2の離床直前や着床

直後など、大きな床反力モーメント鉛直成分を発生できない時期や、摩擦係数の小さい床をロボット1が移動する場合においてもコンプライアンス制御による床反力制御を適切に行うことができ、ロボット1のスピンを防止することができる。より具体的には、足平22の本来の接地性が低下したり、足平22の底面が浮いてしまうような不具合が発生することを防止または抑制することができる。

また、作用11として、床反力の並進力鉛直成分が0の時期、すなわち、両脚がいずれも接地していない時期では、床反力モーメント鉛直成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲が0に設定されることにより、前記した本実施形態のアルゴリズムにより自動的に、実床反力モーメント鉛直成分に依存せずに逆位相腕振りモードに依存したヨー回転復元が行われ、床と足底の間の摩擦力に依存せずにヨー回転復元が行われる。したがって、この時期（空中期）においても、単に、コンプライアンス制御の目標床反力モーメント鉛直成分を修正するだけの方式と異なり、有効にヨー回転復元作用が働く。

作用12として、目標ZMPまわりに発生するモーメント水平成分が0になるように生成したとした場合の歩容を元歩容、前記第1実施形態の如く目標ZMPまわりに発生するモーメント水平成分がモデル操作床反力モーメント水平成分になり、且つ、目標ZMPまわりに発生するモーメント鉛直成分に付加的にモデル操作床反力モーメント鉛直成分が発生するように生成される歩容を修正歩容と呼ぶと、通常、元歩容と修正歩容とは異なる歩容となる。元歩容は定常歩容に漸近するように設定されているので、修正歩容は、通常、定常歩容に漸近しない歩容となる。

しかし、今回歩容（修正歩容）の生成が完了した直後に、再びS3020からS3028が実行され、修正歩容の終端状態を新たな初期状態とした新たな今回歩容が、新たに設定される定常歩容に漸近するように、



新たな今回歩容パラメータが決定されるので、継続的に（長期的に）安定性が保証された歩容を生成し続けることができる。

上記した作用 1 2 は、本願出願人が先に提案した P C T / J P 0 3 / 0 0 4 3 5 の技術とほぼ同様である。但し、これに加えて本実施形態では、次のような作用も発生する。すなわち、ヨー角回転復元のために修正された逆位相腕振り角および角速度の終端状態を新たな初期状態とした新たな今回歩容の逆位相腕振り角軌道が新たに設定される定常歩容の逆位相腕振り角軌道に漸近するように、新たな今回歩容の逆位相腕振り角軌道に関するパラメータが決定されるので、継続的に（長期的に）逆位相腕振り角の安定性が保証された歩容を生成し続けることができる。

なお、本実施形態では、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  が床反力モーメント水平成分許容範囲内の値であるときには、モデル操作床反力モーメント水平成分は 0 になるが、このときのモデル操作床反力モーメント水平成分を図 1 2 の動力学モデルの状態量（例えば動力学モデル上でのロボットの重心位置や、上体質点 3 m の位置等）に応じて設定するようにしてもよい。

また、本実施形態では、補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  が床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲内の値であるときには、モデル操作床反力モーメント鉛直成分補償量は 0 になるが、このときのモデル操作床反力モーメント鉛直成分補償量を図 1 2 の動力学モデルの状態量（例えば動力学モデル上でのロボット 1 の逆位相腕振り角および角速度、上体ヨー角および角速度等）に応じて設定するようにしてもよい。

以上説明した第 1 実施形態は、本発明のうちの第 1 発明、第 2 発明、第 4 ～ 第 9 発明および第 1 5 発明の実施形態になっている。この場合、第 1 実施形態における床反力モーメント鉛直成分（ $M_{dmdz}$  を付加した床反力モーメント鉛直成分）が制限対象量、上体ヨー角偏差および／ま

たは上体ヨー角速度偏差がロボット 1 の状態量の偏差、 $M_{dmdz}$  が補償  
床反力モーメントに相当する。また、第 1 実施形態における歩容生成用  
の床反力モーメント鉛直成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  と床反力モーメ  
ント鉛直成分補償量許容範囲とを合わせたものが制限対象量の許容範囲  
5 に相当する。また、図 5 6 の S 3 0 3 2 で決定される今回歩容瞬時値の  
運動成分が目標運動の仮瞬時値に対応し、これを S 3 0 3 4 で修正した  
ものが目標運動の瞬時値に対応する。また、発明における動力学モデル  
は、図 1 2 の動力学モデルが相当する。

10

次に本発明の第 2 実施形態を図 5 9 ～ 図 6 2 を参照して説明する。な  
お、本実施形態の説明において、前記参考例もしくは前記第 1 実施形態  
と同一構成部分もしくは同一機能部分については前記参考例もしくは第  
1 実施形態と同一の参照符号を用いて説明を省略する。本実施形態は、  
15 前記参考例で前記図 1 ～ 図 3 および図 5 ～ 図 1 2 を参照して説明した事  
項は、前記参考例と同一である。

本実施形態が前記参考例および第 1 実施形態と相違する点の概要を説  
明すると、元歩容と修正歩容が同時に生成される。修正歩容は、実ロボ  
ット 1 の上体姿勢（傾斜角およびヨー角）の安定化のために元歩容から  
20 修正される。さらに、該修正歩容は、コンプライアンス制御により姿勢  
復元に必要な床反力モーメントを発生してもまだ余裕がある（目標 Z M  
P まわりに発生可能な床反力モーメントに余裕がある）場合には、この  
余裕を用いて、可能な範囲で元歩容に収束するように決定される。

本実施形態における制御ユニット 6 0 の機能的構成を表すブロック図  
25 を図 5 9 に示す。本実施形態では、姿勢傾斜安定化制御演算部 1 1 2 が  
求める補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  は、歩容生成装置 1

00に入力される。

また、ヨー安定化制御演算部113が求める補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  も、歩容生成装置100に入力される。

そして、この  $M_{dmdxy}$  および  $M_{dmdz}$  を基にモデル操作床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）とコンプライアンス制御用目標床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）とを決定する補償全床反力モーメント分配器120が、歩容生成装置100に組み込まれ、該歩容生成装置100からコンプライアンス制御用目標床反力モーメントが複合コンプライアンス動作決定部104に出力される。そして、歩容生成装置100内の補償全床反力モーメント分配器120は後述するように、前記第1実施形態の補償全床反力モーメント水平成分分配器110およびモデル操作床反力モーメント鉛直成分決定器111よりも複雑な処理を行う。これ以外の、制御ユニット60の機能的構成は、前記第1実施形態と同一である。

15 図60に本実施形態における歩容生成装置100のメインルーチン処理のフローチャートを示す。

同図60において、S2010からS2028までは、前記参考例のメインフローチャート（図13）のS010からS028までの処理と同一の処理が行なわれる。なお、S028（本実施形態ではS2028）のサブルーチンである図43のフローチャートのS800における初期化においては、今回歩容初期状態は、前回修正歩容（歩容生成装置100が最終的に出力する歩容）の終端状態を今回支持脚座標系に変換したものであり、後述のS2032で決定される元歩容の終端状態は、S2028のサブルーチンのS800では用いられない。

25 次いでS2030に進み、コンプライアンス制御用の床反力モーメント水平成分許容範囲を決定する。この床反力モーメント水平成分許容範

囲の決定方法は、第1実施形態のS3032（図56）と同様である。

S2030の処理を完了した後、あるいはS2016の判断結果がN  
Oである場合には、S2032に進み、元歩容の瞬時値（時刻tの今回  
値）が決定される。元歩容は、目標ZMPまわりの床反力モーメント水  
5 平成分が0になるように生成される歩容である。

この元歩容は、前記第1実施形態の図56のS3032のサブルーチ  
ン処理の一部を変更したアルゴリズムによって生成される。すなわち、  
S3032内のサブルーチン処理（詳しくはS3032のサブルーチン  
処理である図57のS3414のサブルーチン処理）である図58のS  
10 3104およびS3130において、モデル操作床反力モーメント水平  
成分を0として（目標ZMPまわりの目標床反力モーメント水平成分を  
0として）、上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ が求められる。これ以外の処理は、  
図56のS3032の処理と同一でよい。

次いで、S2034に進み、修正歩容の瞬時値を決定する。なお、修  
15 正歩容は、歩容生成装置100から最終的に出力される目標歩容である。

S2034の処理は、図61のフローチャートで示すサブルーチン処  
理により行なわれ、以下にその詳細を説明する。

まずS2100からS2111までは、第1実施形態で説明した図5  
7のS3400からS3411と同一の処理が実行される。

20 次いで、S2112に進み、歩容パラメータを基に現在時刻での床反  
力モーメント水平成分許容範囲[Mxymin, Mxymax]を求める。これは、  
図57のS3412での床反力モーメント水平成分許容範囲[Mxymin,  
Mxymax]の決定と同様に行われる。

次いで、S2114に進み、床反力モーメント水平成分許容範囲と床  
25 反力モーメント鉛直成分許容範囲と床反力水平成分許容範囲との条件を  
満足するように、モデル操作床反力モーメント（水平成分および鉛直成

分)、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント、上体水平加速度、上体姿勢傾斜角加速および逆位相腕振り角加速度が決定される。

S 2 1 1 4の詳細を、その処理を示す図62のフローチャートを用いて、以下に説明する。

- 5       まず、S 2 2 0 0において、修正歩容の上体水平位置と元歩容の上体水平位置との差であるモデル間上体水平位置差が求められる。この時点では、修正歩容の上体水平位置の今回値（時刻  $t$  での値）は未だ求められていない。そこで、S 2 2 0 0では、修正歩容の上体水平位置の前回値（時刻  $t - \Delta t$  の制御周期で最終的に求められた値）と、元歩容の上
- 10    体水平位置の前回値（時刻  $t - \Delta t$  の制御周期でS 2 0 3 2において求められた値）あるいは今回値（時刻  $t$  の制御周期でS 2 0 3 2において求められた値）とを用いて、モデル間上体水平位置差が算出される。

- 次いで、S 2 2 0 2に進み、修正歩容の上体姿勢傾斜角と元歩容の上体姿勢傾斜角との差であるモデル間上体姿勢傾斜角差が求められる。この
- 15    のS 2 2 0 2では、S 2 2 0 0のモデル間上体水平位置差の算出処理の場合と同様、修正歩容の上体姿勢傾斜角の前回値と、元歩容の上体姿勢傾斜角の前回値又は今回値とを用いてモデル間上体姿勢傾斜角差が求められる。

- 次いで、S 2 2 0 4に進み、修正歩容の逆位相腕振り角と元歩容の逆
- 20    位相腕振り角との差であるモデル間逆位相腕振り角差が求められる。このS 2 2 0 4では、S 2 2 0 0のモデル間上体水平位置差の算出処理の場合と同様、修正歩容の逆位相腕振り角の前回値と、元歩容の逆位相腕振り角の前回値又は今回値とを用いてモデル間逆位相腕振り角差が求められる。

- 25    次いで、S 2 2 0 6に進み、モデル間上体水平位置差を基に、その差を0に収束させるために必要なモデル上体水平位置安定化床反力モーメ

ント要求値  $M_{pfdmd}$  が決定される。単に修正歩容の上体並進モードの上体水平加速度を発生させる床反力モーメントを元歩容の上体並進モードの上体水平加速度を発生させる床反力モーメントに一致させると、モデル間上体水平位置差は発散する。モデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  は、前記上体並進モードによって修正歩容の上体水平位置を元歩容の上体水平位置に戻すよう動作を行った時に、これに伴って発生する床反力モーメントから元歩容の上体並進モードの上体水平加速度を発生させる床反力モーメントを減じたモーメントとしての意味を持つ。

- 10 具体的には、モデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  は、例えば次式のフィードバック制御則によって決定される。この例では、フィードバック制御則として、PD制御則を用いているが、PID等、他のフィードバック制御則を用いてもよい。

$$15 \quad M_{pfdmd} = K_{mp} * \text{モデル間上体水平位置差} \\ + K_{mpv} * \text{モデル間上体水平位置差の時間微分値} \\ \dots\dots \text{式 d 2 8}$$

但し、 $K_{mp}$ 、 $K_{mpv}$  はフィードバックゲイン（比例ゲイン、微分ゲイン）である。

20

次いで、S 2 2 0 8に進み、モデル間上体姿勢傾斜角差を基に、その差を0に収束させるために必要なモデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が決定される。単に修正歩容の上体傾斜モードの上体姿勢傾斜角加速度を発生させる床反力モーメントを元歩容の上体傾斜モードの上体姿勢傾斜角加速度を発生させる床反力モーメントに一致させると、モデル間上体姿勢傾斜角差は0に収束しない。モデル上

25

171

体姿勢傾斜角安定化床反力モーメント要求値  $Mrfdmd$  は、上体傾斜モードによって修正歩容の上体姿勢傾斜角を元歩容の上体姿勢傾斜角に戻すよう動作を行った時に、これに伴って発生する床反力モーメントから元歩容の上体傾斜モードの上体姿勢傾斜角加速度を発生させる床反力モーメントを減じたモーメントとしての意味を持つ。

具体的には、モデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメント要求値  $Mrfdmd$  は、例えば次式のフィードバック制御則によって決定される。この例では、フィードバック制御則として、PD制御則を用いているが、PID等、他のフィードバック制御則を用いてもよい。

$$\begin{aligned} Mrfdmd = & Kmr * \text{モデル間上体姿勢傾斜角差} \\ & + Kmr_v * \text{モデル間上体姿勢傾斜角差の時間微分値} \end{aligned}$$

……式 d 2 9

但し、 $Kmr$ 、 $Kmr_v$  はフィードバックゲイン（比例ゲイン、微分ゲイン）である。

次いで、S 2 2 1 0に進み、モデル間逆位相腕振り角差を基に、その差を0に収束させるために必要なモデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメント要求値  $Mafdm$  が決定される。単に修正歩容の逆位相腕振りモードの逆位相腕振り角加速度を発生させる床反力モーメントを元歩容の逆位相腕振りモードの逆位相腕振り角加速度を発生させる床反力モーメントに一致させると、モデル間逆位相腕振り角は0に収束しない。モデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメント要求値  $Mafdm$  は、逆位相腕振りモードによって修正歩容の逆位相腕振り角を元歩容の逆位相腕振り角に戻すよう動作を行った時に、これに伴って発生する床反力モーメントから元歩容の逆位相腕振りモードの逆位相腕振り角加速度を発生

させる床反力モーメントを減じたモーメントとしての意味を持つ。

具体的には、モデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメント要求値  $M_{afdm}$  は、例えば次式のフィードバック制御則によって決定される。

この例では、フィードバック制御則として、PD制御則を用いているが、

5 PID等、他のフィードバック制御則を用いてもよい。

$M_{afdm} = K_a * \text{モデル間逆位相腕振り角差}$

$+ K_v * \text{モデル間逆位相腕振り角差の時間微分値}$

……式 d 2 9 b

10 但し、 $K_a$ 、 $K_v$  はフィードバックゲイン（比例ゲイン、微分ゲイン）である。

ところで、最終的に決定された修正歩容の上体並進モードに伴って発生する床反力モーメント水平成分から元歩容の上体並進モードの上体水平加速度を発生させる床反力モーメント水平成分を減じたモーメントを、  
15 モデル上体水平位置安定化床反力モーメントと呼ぶ。また、最終的に決定された修正歩容の上体傾斜運動モードに伴って発生する床反力モーメント水平成分から元歩容の上体傾斜運動モードの上体姿勢傾斜角加速度を発生させる床反力モーメント水平成分を減じたモーメントを、モデル  
20 上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメントと呼ぶ。また、最終的に決定された修正歩容の逆位相腕振りモードに伴って発生する床反力モーメント鉛直成分から元歩容の逆位相腕振りモードの逆位相腕振り角加速度を発生させる床反力モーメント鉛直成分を減じたモーメントを、モデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメントと呼ぶ。

25 一方、摂動運動と摂動床反力とには線形性が近似的に成立する、すなわち、異なる摂動運動を元歩容の運動に加えた運動の床反力は、元歩容



## 173

の床反力にそれぞれの摂動運動が発生する摂動床反力を加えたものにほぼ一致する。また、逆位相腕振りモードでは、床反力モーメント水平成分は変化しない。したがって、次式が近似的に成立する。

$$\begin{aligned} 5 \quad & \text{モデル操作床反力モーメント水平成分} \\ & = \text{モデル上体水平位置安定化床反力モーメント} \\ & + \text{モデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメント} \end{aligned}$$

……式 d 3 0

- 10 この式 d 3 0 が近似的に成立することと、逆位相腕振り角加速度に比例して床反力モーメント鉛直成分が変化することとを考慮しつつ、モデル上体水平位置安定化床反力モーメントをモデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致またはなるべく近くなるように決定し、かつ、モデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメントをモデル
- 15 上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致またはなるべく近くなるように決定しつつ、かつ、モデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメントをモデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメント要求値  $M_{afdm}$  に一致またはなるべく近くなるように決定すれば、修正歩容に適切なモデル操作床反力モーメントを発生させて、以下に示す復
- 20 元条件を満足しつつ、修正歩容の上体水平加速度と上体姿勢傾斜角加速度とを、それぞれ元歩容の上体水平加速度と上体姿勢傾斜角加速度とに可能な範囲で収束させることができる。

そこで、S 2 2 1 0 の後、S 2 2 1 2 に進み、以下の条件（これらを復元条件と呼ぶ）をできる限り満足するようにモデル上体水平位置安定

25 化床反力モーメント（上体並進モードの床反力モーメント）とモデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメント（上体傾斜モードの床反力モーメント）

## 174

ント) とモデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメントとを決定する。

さらに、上記のモデル上体水平位置安定化床反力モーメントとモデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメントとモデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメントとの定義を満足するように、修正歩容の上体水平加速度

- 5 と上体姿勢傾斜角加速度と逆位相腕振り角加速度とを決定する。なお、以下に示す復元条件は、番号が小さい条件ほど優先度が高いものとする。つまり相反して両立できない条件がある場合には、番号が小さい条件を優先して満足（成立）させる。ただし、復元条件 1、2 および 3 は必ず満足（成立）させる。

- 10 復元条件 1) 補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  とモデル操作床反力モーメントの和（これは、前記式 d 27 b が成立する場合には、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分に相当する）が床反力モーメント水平成分許容範囲を越えないこと。

- 15 復元条件 2) 修正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲を越えないこと。

復元条件 3) 修正歩容の床反力モーメント鉛直成分と補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  の和（これは、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分に相当する）が、床反力モーメント鉛直成分許容範囲を越えないこと。

- 20 復元条件 4) モデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメントが、モデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致またはできる限り近いこと。この条件は、修正歩容の上体姿勢傾斜角が元歩容（当初予定した歩容）の上体姿勢傾斜角に収束するための条件である。

- 25 復元条件 5) モデル上体水平位置安定化床反力モーメントが、モデル上体水平位置安定化床反力モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致またはできる限り近いこと。この条件は、修正歩容の上体水平位置が元歩容（当

初予定した歩容)の上体水平位置に収束するための条件である。

復元条件6)モデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメントが、モデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメント要求値  $M_{afdm}$  に一致またはできる限り近いこと。この条件は、修正歩容の逆位相腕振り角が元歩容(当初予定した歩容)の逆位相腕振り角に収束するための条件である。

復元条件7)モデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメント、モデル上体水平位置安定化床反力モーメントおよびモデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメントがそれぞれ連続であること。

上記のような復元条件1~6を満足するような上体水平加速度、上体姿勢傾斜角加速度、逆位相腕振り角加速度等を決定するS2212の処理は具体的には例えば次のように実行される。

まず、上記復元条件1、2、4および5を満足するように、モデル上体水平位置安定化床反力モーメントおよびモデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメントが決定され、さらに上体水平加速度および上体姿勢傾斜角加速度が決定される。この処理の詳細は、本願出願人が先に提案したPCT/JP03/00435の技術に記載されているので、ここでは説明を省略する。

次いで、上記復元条件3および6を満足するようにモデル逆位相腕振り安定化床反力モーメントが決定され、さらに逆位相腕振り角加速度が決定される。

具体的には、上記のごとく決定された上体水平加速度および上体姿勢傾斜角加速度と元歩容の逆位相腕振り角加速度 $\beta_{aorg}$ で仮に運動した場合に発生する(運動に動力学的に釣り合う)目標ZMPまわりの床反力モーメント鉛直成分を求める。以降、これを無補正時床反力モーメント鉛直成分と呼ぶ。

次いで、次式のように、無補正時床反力モーメント鉛直成分とモデル

176

逆位相腕振り角安定化床反力モーメント要求値  $M_{afdm}$  と補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmz}$  との和  $M_{sumz}$  を求める。

$M_{sumz}$  = 無補正時床反力モーメント鉛直成分

5  $+ M_{afdm} + M_{dmz}$

次いで、次式により、モデル逆位相腕振り安定化床反力モーメントが決定される。

10  $M_{sumz} >$  床反力モーメント鉛直成分許容範囲上限値である場合

モデル逆位相腕振り安定化床反力モーメント  $= -M_{dmz}$

− 無補正時床反力モーメント鉛直成分

+ 床反力モーメント鉛直成分許容範囲上限値

15  $M_{sumz} <$  床反力モーメント鉛直成分許容範囲下限値である場合

モデル逆位相腕振り安定化床反力モーメント  $= -M_{dmz}$

− 無補正時床反力モーメント鉛直成分

+ 床反力モーメント鉛直成分許容範囲下限値

床反力モーメント鉛直成分許容範囲下限値  $\leq M_{sumz}$ 、且つ、 $M_{sumz} \leq$

20 床反力モーメント鉛直成分許容範囲上限値である場合

モデル逆位相腕振り安定化床反力モーメント

$=$  モデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメント要求値  $M_{afdm}$

……式 d 2 6 c

25 次いで、修正歩容の逆位相腕振り角加速度が次式によって求められる。

177

修正歩容の逆位相腕振り角加速度

= 元歩容の逆位相腕振り角加速度  $\beta \text{ aorg}$

+ モデル逆位相腕振り安定化床反力モーメント

/ 腕振り運動の等価慣性モーメント  $\Delta \text{ Maz}$

5

修正歩容の床反力モーメント鉛直成分は、元歩容の逆位相腕振り角加速度  $\beta \text{ aorg}$  とモデル逆位相腕振り安定化床反力モーメントの和であることから、上式のごとくモデル逆位相腕振り安定化床反力モーメントを決定することにより、上記復元条件 3 が満足される。

- 10 上述したように S 2 2 1 2 の処理を実行した後、S 2 2 1 4 に進み、前記式 d 3 0 により、モデル操作床反力モーメント水平成分が決定される。すなわち、S 2 2 0 8 で求めたモデル上体水平位置安定化床反力モーメントとモデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメントとの和がモデル操作床反力モーメント水平成分として決定される。なお、最終的に決定される修正歩容の運動の今回瞬時値に基づいて目標 Z M P まわりの床反力モーメントを直接算出して、これをもってモデル操作床反力モーメントとしても良い。

- 次いで、S 2 2 1 6 に進み、前記式 d 2 7 b により、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分が決定される。すなわち、補償全床反力モーメント水平成分  $\text{Mdmdxy}$  と S 2 2 1 4 で求めたモデル操作床反力モーメント水平成分との和がコンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分として決定される。

- 次いで、S 2 2 1 8 に進み、図示する式によって、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分を決定する。なお、図示する式における修正歩容に釣り合う（修正歩容の運動に動力学的に釣り合う）床反力モーメント鉛直成分は、無補正時床反力モーメント鉛直とモデル逆

25

## 178

位相腕振り安定化床反力モーメントの和であるが、最終的に決定される修正歩容の運動の今回瞬時値に基づいて目標ZMPまわりの床反力モーメント鉛直成分を直接算出しても良い。

5 以上により、図61のS2114の処理が終了し、次に、S2116に進む。このS2116の処理は、前記第1実施形態における図57のS3416と同一であり、上体水平加速度の2階積分により上体水平位置の今回値が決定されると共に、上体姿勢傾斜角加速度の2階積分により上体姿勢傾斜角の今回値が決定される。

10 次に、S2118に進む。このS2118の処理は、前記第1実施形態における図57のS3418と同一であり、逆位相腕振り角加速度の2階積分により逆位相腕振り角の今回値が決定される。

次いで、図60のS2036に進んで、時刻tに制御周期 $\Delta t$ を加え、再び、S2014に戻り、制御周期毎のタイマー割り込みを待つ。

15 補足すると、本実施形態における動力学モデルによる歩容瞬時値決定においては、動力学モデルの状態量（あるいは前回、前前回の歩容瞬時値）も必要であるので、修正歩容生成用と元歩容生成用との2つの動力学モデルが必要である。本実施形態では、それらの動力学モデルは図12に示した動力学モデルである。

20 本実施形態においては、上記のごとく、元歩容と修正歩容とが並列的に生成され、修正歩容は、実ロボット1の姿勢（傾斜角およびヨー角）安定化のために修正されると共に、コンプライアンス制御により姿勢復元に必要な床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）を発生してもまだ余裕がある場合には、この余裕を用いて、可能な範囲で元歩容に収束するようにしている。このため、前記第1実施形態の作用効果に加え、  
25 当初設定した元歩容に近い、すなわち、当初の要求通りの歩容に近い歩容を生成することができる。したがって、あらかじめ設定された移動経

路がある場合には、移動経路から大きくずれることを防止することが可能となる。また、修正歩容の上体姿勢傾斜角が元歩容（当初決定した歩容）の上体姿勢傾斜角に収束することを、修正歩容の上体水平位置が元歩容（当初決定した歩容）の上体水平位置に収束することよりも優先した（床反力水平成分許容範囲を満たす範囲で可能な限り上体並進モードの運動を調整した）ので、上体姿勢傾斜角が大きく変動することを抑制することができる。

以上説明した第2実施形態は、本発明のうちの第1～第9発明、および第15発明の実施形態になっている。この場合、第2実施形態における床反力モーメント鉛直成分（ $M_{dmdz}$ を付加した床反力モーメント鉛直成分）が制限対象量、上体ヨー角偏差および／または上体ヨー角速度偏差がロボット1の状態量の偏差、 $M_{dmdz}$ が補償床反力モーメントに相当する。また、第2実施形態における歩容生成用の床反力モーメント鉛直成分許容範囲 $[M_{zmin}, M_{zmax}]$ が制限対象量の許容範囲に相当する。

また、第2実施形態におけるモデル逆位相腕振り角安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  が第3発明におけるモデル補正床反力モーメントに相当する。また、図61のS2114のサブルーチンで無補正時床反力モーメント鉛直成分を求めたときの運動が第2発明における所定の仮瞬時値に対応する。また、発明における動力学モデルは、図12の動力学モデルが相当する。

次に本発明の第3実施形態を図63～図70を参照して説明する。なお、本実施形態の説明で、前記参考例または前記第1もしくは第2実施形態と同一構成部分もしくは同一機能部分については該参考例、第1実施形態もしくは第2実施形態と同一の参照符号を用いて詳細な説明を省

略する。

本実施形態では、制御ユニット60の機能的構成は、前記第2実施形態のもの、すなわち前記図59に示したものと同一である。但し、本実施形態では、歩容生成装置100が実行する歩容生成のアルゴリズムは、  
5 前記第2実施形態のものと相違している。そして、歩容生成装置100以外の各部の処理は、前記第2実施形態と同一である。

図63は、本実施形態における歩容生成装置100の処理の概要を示すブロック図である。この図63を参照して、歩容生成装置100の処理の概要を以下に説明する。なお、図63を用いて以下に説明する処理  
10 の概要は、後述する第4～第6実施形態についても同様である。また、本実施形態および後述の第4～第6実施形態では、前記図12の動力学モデルを単純化モデルと称する。

図示の如く、歩容生成装置100は歩容パラメータ決定部100aを備える。歩容パラメータ決定部100aは、目標歩容のパラメータ（目標歩容を規定するパラメータ）の値あるいは時系列テーブルを決定する。  
15 これは、後述の図65のフローチャートのS3520からS3530までの処理に相当する。

詳細は後述するが、歩容パラメータ決定部100aが決定するパラメータには、目標足平位置姿勢軌道、目標腕姿勢軌道、基準上体姿勢軌道、  
20 目標ZMP軌道、目標床反力鉛直成分軌道等を規定するパラメータが含まれる他、床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータと、ZMP許容範囲（もしくは床反力モーメント水平成分許容範囲）を規定するパラメータと、床反力モーメント鉛直成分許容範囲を規定するパラメータとが含まれる。この場合、本実施形態で設定する床反力水平成分許容範囲  
25 および床反力モーメント鉛直成分許容範囲は、後述のS3526の処理で設定される単純化モデル歩容用のものと、S3530で設定される歩



容補正用のものとの2種類がある。一方、ZMP許容範囲（もしくは床反力モーメント水平成分許容範囲）は、S3530の処理で設定されるフルモデル補正用（歩容補正用）のものだけである。なお、本実施形態では、S3530ではZMP許容範囲を規定するパラメータを設定する  
5 が、これは、床反力モーメント水平成分許容範囲を規定するパラメータと設定することと同等である。これは、前記第1実施形態の図56のS3030に関して説明した如く、床反力モーメント水平成分を、目標床反力鉛直成分で割ったものが、ZMP（床反力中心点）の目標ZMPからのずれ量を表すものとなるからである。

10 ここで、本実施形態で設定するZMP許容範囲は、図64の如く設定される。詳細は、PCT/JPO3/00435に詳細に記載されているのでここでは、これ以上の説明を省略する。

歩容パラメータ決定部100aで決定された歩容パラメータは目標瞬時値発生部100bに入力される。目標瞬時値発生部100bは入力された歩容パラメータに基づき、目標足平位置姿勢、目標ZMP、目標床  
15 反力鉛直成分、目標腕姿勢、目標全体重心鉛直位置、目標上体鉛直位置、床反力水平成分許容範囲、ZMP許容範囲、基準上体姿勢角および基準逆位相腕振り角の、現在時刻tにおける瞬時値を逐次算出（発生）する（図63では一部の目標瞬時値のみを記載している）。この目標瞬時値  
20 発生部100bの処理は、後述の図65のフローチャートS3532の処理のなかで実行される図57のS3400～S3412の処理、並びに、図65のS3534の処理に相当する。なお、本実施形態では、目標瞬時値発生部100bが算出する目標瞬時値のうち、一部の瞬時値（具体的には目標上体鉛直位置の瞬時値）は仮値であり、後に修正され  
25 る。また、目標瞬時値発生部100bが算出する床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲の瞬時値は、単純化モデル

歩容用の瞬時値と歩容補正用の瞬時値とがある。

目標瞬時値発生部 100b で算出（発生）された目標瞬時値（一部は仮瞬時値）は、フルモデル補正部 100c に入力される。また、フルモデル補正部 100c には、前記姿勢傾斜安定化制御演算部 112（図 5  
5 9 を参照）で求められる補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  および前記ヨー安定化制御演算部 113（図 5 9 を参照）で求められる補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  も入力される。フルモデル補正部 100c は、動力学モデルとして、単純化モデル 100c1 とフルモデル 100c2 とを備える。該フルモデル補正部 100c は、単純化モデル 100c1 に基づいて、入力値から目標上体位置姿勢および逆位相腕振り角の仮瞬時値等を決定すると共に、さらに決定された上体位置姿勢および逆位相腕振り角の仮瞬時値等をフルモデル 100c2 を用いて修正する。

尚、単純化モデル 100c1 をフルモデル補正部 100c2 に含ませない構成も可能である。また、フルモデル 100c2 は、後述するように、逆フルモデル（逆動力学フルモデル）と順フルモデル（順動力学フルモデル）とのいずれかを含む。

フルモデル補正部 100c は、基本的には、次の A1～A4 の条件を満足するように、B の処理を実行する。すなわち、フルモデル補正部 100c は、

A1) フルモデル補正部 100c により生成される補正歩容の運動に釣り合う床反力モーメントに補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  と補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  とを加えたものがフルモデル補正部 100c から出力するコンプライアンス制御用床反力モーメントに一致する。

A2) 真の ZMP（目標 ZMP のまわりにコンプライアンス制御用目標

床反力モーメントを発生させることによって修正された本来の定義を満足するZMP)は、ZMP許容範囲(安定余裕が十分維持できる許容範囲)に存在する。

A3) 床反力水平成分は歩容補正用の床反力水平成分許容範囲内にある。

- 5 A4) 目標ZMPのまわりに発生すべきコンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分が床反力モーメント鉛直成分許容範囲内にある。という条件を満足するように、

B) 単純化モデルを用いて決定された単純化モデル歩容の上体位置姿勢を補正すると共に、目標ZMPまわりのコンプライアンス制御用目標床

- 10 反力モーメントを出力する。

なお、上記条件A2は、目標ZMPまわりに発生させる床反力モーメントをZMP許容範囲に対応する床反力モーメント水平成分許容範囲内に収めることと同等である。

- ここで、上記単純化モデル100c1とフルモデル100c2とについて説明しておく。単純化モデル100c1は、動力学の精度よりも、  
15 演算量低減や挙動解析のし易さに重点を置いた動力学モデルであり、動力学的に一部無視があったり(例えば、重心まわりの角運動量変化を無視したり)、矛盾があるもの(厳密さを欠くもの)でも良い。本実施形態では前記参考例で説明した図12の動力学モデル(前記式01~05  
20 で記述される動力学モデル)が単純化モデル100c1として用いられる。

- また、フルモデル100c2は、単純化モデル100c1とは異なるロボット動力学モデルを意味する。これは、単純化モデル100c1よりも近似精度の高いロボット動力学モデルであることが望ましい。図示  
25 例で説明すれば、本実施形態では先に述べたように前記図12に示した動力学モデルを単純化モデル100c1として用いるので、それよりも、

近似精度の高い動力学モデル、例えば前記図49に示した多質点モデル（ロボット1の各リンクにそれぞれ質点を有するモデル）のようなロボット動力学モデルをフルモデル100c2として用いることが望ましい。この場合、該フルモデル100c2は、質点のまわりに慣性モーメント  
5 を設定するものであっても良い。

しかし、単純化モデル100c1とフルモデル100c2とは、必ずしもモデルの近似精度が異なる必要はない。単純化モデル100c1とフルモデル100c2とは、動力学方程式が同じで、床反力水平成分許容範囲およびまたは床反力モーメント鉛直成分許容範囲が異なっている、  
10 すなわち、単純化モデル歩容用の許容範囲と、歩容補正用（フルモデル補正用）の許容範囲とが異なっているだけでも良い。たとえば、単純化モデル100c1を用いた歩容を生成する際の床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲を大きくとり（摩擦限界を越えていても良い）、フルモデル100c2を用いて歩容を修正する際の  
15 床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲をロボット1のスリップもしくはスピンが発生しにくいように狭く設定するだけでも良い。

尚、この明細書において、目標足平位置姿勢、目標床反力（特に、目標ZMPと目標床反力鉛直成分）に基づいて（入力して）上体位置姿勢  
20 および逆位相腕振り角を算出する（出力させる）のに使用するモデルを「順動力学モデル」と呼び、目標足平位置姿勢、目標上体姿勢、目標上体位置および逆位相腕振り角に基づいて（入力して）床反力（特に、目標ZMPもしくは目標ZMPまわりの床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）と床反力水平成分）を算出する（出力させる）のに使用する  
25 モデルを「逆動力学モデル」と呼ぶ。順動力学モデルの入力には、少なくとも目標床反力が含まれ、逆動力学モデルの入力には、少なくとも

目標運動が含まれる。

フルモデル補正部 100c が備えるフルモデル 100c2 は、逆動力学フルモデル（しばしば「逆フルモデル」と略称）または順動力学フルモデル（しばしば「順フルモデル」と略称）を備える。一般的には、逆  
5 動力学モデルの演算に比べ、順動力学モデルの演算は、演算量が多くなりがちである。

以上が本実施形態（第3実施形態）での歩容生成装置 100 における処理の概要である。

次に、本実施形態における歩容生成装置 100 の処理を詳説する。本  
10 実施形態における歩容生成装置 100 は、図 65 のフローチャートに示す処理を実行して、歩容を生成する。

まず、S3510 から S3528 までにて、前記第1実施形態で説明した図 56 の S3010 から S3028 までの処理と同一の処理が実行される。なお、S3026 のサブルーチンである図 39 の S608 で決  
15 定する今回歩容の床反力水平成分許容範囲および S610 で決定する床反力モーメント鉛直成分許容範囲は、前記参考例、第1実施形態および第2実施形態の場合よりも厳密に摩擦力限界を考慮せずともよく、摩擦力限界を超えるような範囲に設定してもよい。これは、後述するフルモデル補正によって、床反力水平成分および床反力モーメント鉛直成分は  
20 最終的にフルモデル補正用の床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲によって制限されることとなるからである。

次いで、S3530 に進み、フルモデル補正用（歩容補正用）の床反力水平成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分許容範囲と ZMP 許容範囲（床反力中心点許容範囲）とをそれぞれ規定するパラメータを決定  
25 する。この場合、フルモデル補正用の床反力水平成分許容範囲は、例えば前記単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲と同様、X 軸方向

(前後方向)、Y軸方向(左右方向)のそれぞれについて、床反力鉛直成分軌道と、前記式12とに基づいて、前記図30に示したようなパターンに設定される。そして、例えば、前記式12の  $k_a * \mu$  の値がフルモデル補正用の床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータとして設定される。但し、この床反力水平成分許容範囲は、式12の係数  $k_a$  の値を、単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲よりも小さめに設定する等して、確実に摩擦限界内の範囲に設定することが望ましい。

床反力モーメント鉛直成分許容範囲に関しても床反力水平成分許容範囲と同様に設定される。すなわち、前記式1012に基づいて、前記図41に示したようなパターンに設定される。

また、ZMP許容範囲は、前記第1実施形態における図56のS3030で床反力モーメント水平成分許容範囲の設定に関して説明した場合と同様に設定される。なお、ZMP許容範囲に目標床反力鉛直成分を乗じることで、ZMP許容範囲をこれと等価な床反力モーメント水平成分許容範囲に変換してもよいことはもちろんである。

次いで、S3532に進み今回歩容瞬時値(現在時刻  $t$  の値)が前記単純化モデル(図12の動力学モデル)を用いて決定される。このS3532の処理は、前記参考例における図13のS030の処理と同一である。

以上説明したS3532までの処理によって生成された現在時刻  $t$  における歩容の瞬時値を、以降、単純化モデル歩容瞬時値という。本実施形態では、この単純化モデル歩容瞬時値は、単純化モデル(図12の動力学モデル)を用いて、ロボット1にその運動によって発生する慣性力と重力との合力が目標ZMPまわりに発生する床反力モーメント水平成分が0になるように(目標ZMPに関する動力学的平衡条件を満たすように)決定される。

この場合、単純化モデル歩容瞬時値のうちの、上体水平位置および上体姿勢傾斜角の瞬時値と、上体鉛直位置の瞬時値と、逆位相腕振り角の瞬時値とは仮瞬時値であり、後述するフルモデル補正によって補正されるものである。また、本実施形態における単純化モデル歩容瞬時値のうち、目標ZMPまわりの目標床反力モーメント水平成分の瞬時値は定常的に0であるが、後述するフルモデル補正によって目標ZMPまわりに発生させる床反力モーメント水平成分の目標値としてのコンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分が生成される。

次に、S3534に進み、歩容補正用（フルモデル補正用）の床反力水平成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分許容範囲とZMP許容範囲を規定するパラメータ（S3530で設定したもの）を基に、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分許容範囲とZMP許容範囲との瞬時値（現在時刻 $t$ の値）が求められる。

次いで、S3536に進み、フルモデルを用いて補正歩容の発生（歩容の補正）を行い、最終的な目標歩容の瞬時値が決定される。すなわち、前記図63を参照して説明したように、補正目標上体位置姿勢、補正目標逆位相腕振り角や、目標ZMPまわりの目標床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）としてのコンプライアンス制御用目標床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）の算出（決定）などが実行される。

次いで、S3538に進み、時刻 $t$ を $\Delta t$ だけ増やし、再びS3514に戻り、S3514からS3538までの処理が繰り返される。

上記S3536の処理は、本実施形態の特徴をなす部分であり、以下にその処理を詳説する。本実施形態に係る装置の歩容補正手法は、フルモデルフィードフォワード補正型である。また、逆動力学フルモデル（逆フルモデル）を用いる手法で、かつ単純化モデル歩容の入力を補正しない手法であり、かつ摂動モデルを用いる手法である。

図 6 6 は、本実施形態に係る歩容生成装置 1 0 0 の動作、具体的には、  
図 6 5 のフロー・チャートの S 3 5 3 6 の歩容の修正手法を説明する機  
能ブロック図である。ただし、図 6 6 の単純化モデル 2 0 0 は、単に動  
力学モデルだけでなく、前述の S 3 5 1 0 から S 3 5 3 2 の処理、すな  
5 わち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表す。したがって、  
図 6 6 において、単純化モデル 2 0 0 から先の部分が S 3 5 3 6 の処理  
に相当する。

尚、歩容補正用（フルモデル補正用）の床反力水平成分許容範囲と Z  
M P 許容範囲の瞬時値を決定する処理は、図 6 5 のフローチャートの参  
10 照符号 S 3 5 3 4 を用いて示している。

実際の処理はひとつのコンピュータで実行されるので、ブロック図を  
離散化した後、ブロック図の上流側から下流側（歩容出力側）に向かっ  
て順に実行される。ただし、上流側に戻るフィードバック量は、前回制  
御周期（現在時刻  $t$  に対して時刻  $t - \Delta t$ ）に算出した値（状態量）を  
15 用いることとする。尚、以降、前回制御周期（時刻  $t - \Delta t$ ）に算出し  
た値を前回値と略す。

S 3 5 3 6 の処理が実行される毎に、ブロック図の 1 制御周期分の演  
算が実行される。

S 3 5 3 6 では、まず、上記のごとく得られた単純化モデル歩容の目  
20 標上体姿勢角（以降、単純化モデル上体姿勢角と呼ぶ。また、このうち  
の傾斜角成分を単純化モデル上体姿勢傾斜角と呼ぶ。）、目標上体水平位  
置（以降、単純化モデル上体水平位置と呼ぶ）、目標重心位置、目標足  
平位置姿勢、目標腕姿勢（目標逆位相腕振り角を含む）などの運動を表  
す変数（これを運動変数と呼ぶ）の瞬時値と、目標 Z M P の瞬時値とが  
25 前記逆動力学フルモデル（逆フルモデル）2 0 1 に入力される。入力さ  
れた運動変数で表される運動に釣り合う（すなわち運動によってフルモ



デルが発生する) 床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメント (水平成分および鉛直成分) が、逆フルモデル 2 0 1 の演算処理によって算出される。なお、本実施形態では、単純化モデル歩容における目標 Z M P まわりの床反力モーメント水平成分は 0 であるので、逆フルモデル 2 0 1 によって算出される目標 Z M P まわりの床反力モーメント水平成分は、単純化モデル歩容の誤差としての意味を持つものである。

5 なお、逆フルモデル 2 0 1 により求められた床反力水平成分と床反力モーメント水平成分と床反力モーメント鉛直成分とをそれぞれ「フルモデル床反力水平成分」、「フルモデル床反力モーメント水平成分」、「フルモデル床反力モーメント鉛直成分」と呼ぶ。また、以降、しばしば、フルモデル床反力水平成分を  $F_{full}$ 、フルモデル床反力モーメント水平成分を  $M_{fullxy}$ 、フルモデル床反力モーメント鉛直成分を  $M_{fullz}$ 、と略す。

10 また、前記逆フルモデル 2 0 1 は、目標重心位置を満足する上体鉛直位置を算出する。さらに、図示は省略しているが、逆フルモデル 2 0 1 は、重心水平位置も算出する。

補足すると、フルモデルには目標全体重心鉛直位置を入力しており、また目標床反力鉛直成分は目標全体重心鉛直位置の 2 階微分値から求められるので、フルモデルには、特に目標床反力鉛直成分を入力する必要はない。冗長であっても演算を減らすためなどの理由で、フルモデルに  
20 目標床反力鉛直成分を入力しても良い。

ここで、歩容補正に用いられる摂動モデルについて説明する。

摂動モデルは、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 および逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 から成る。尚、摂動モデルは、このように 3 つのモデルに分離しないで、図 1 2 のようなひとつのモデルにしても良い。また、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 は図では上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3  
25

と略す。

上体水平位置補正用摂動モデル 202 は、前記上体並進モードにおける床反力の摂動と上体水平位置の摂動との関係を表す。

上体水平位置補正用摂動モデル 202 は、目標床反力モーメントの補  
5 正量を入力し、これに動力学的に釣り合う目標上体水平位置の補正量を  
算出する。この入力（目標床反力モーメントの補正量）を、上体水平位置  
補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  と呼ぶ。また、上体水平位置補正用  
摂動モデル 202 の出力（目標上体水平位置の補正量）を、補正用摂動  
モデル上体水平位置  $X_c$  と呼ぶ。また、上体水平位置補正用摂動モデル  
10 202 が発生する床反力水平成分を上体水平位置補正用摂動モデル床反  
力水平成分  $F_p$  と呼ぶ。

上体水平位置補正用摂動モデル 202 は、図 67 のように、支点と倒  
立振子質点（上体質点）とこれらを結合する伸縮自在な支持棒から成る  
倒立振子で表される。支点の水平位置は前記した今回歩容の支持脚座標  
15 系の原点の水平位置に一致し、支点の鉛直位置は目標 ZMP の鉛直位置  
に一致するように支点の位置が設定されている。倒立振子質点の質量  
 $m_b$  は、図 12 に示す前記単純化モデル（3 質点＋フライホイールのモ  
デル）の上体質点質量と同じである。倒立振子質点の鉛直位置  $Z_c$  は、  
単純化歩容に対応する図 12 に示す単純化モデルの上体質点位置の鉛直  
20 位置  $Z_b$  と同一とする。

この上体水平位置補正用摂動モデル 202 は、前記単純化モデルにお  
いて、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体質点水平位置の摂動  $\Delta X_b$   
との関係を表す。

そこで、 $M_y$ 、 $X_b$ 、 $Z_b$  以外は定数とみなして、床反力モーメントの  
25 摂動  $\Delta M_y$  と上体質点水平位置の摂動  $\Delta X_b$  との関係を前記式 03y から  
求めると、次式が得られる。

$$\Delta M_y = -m_b * \Delta X_b * (g + d^2 Z_b / dt^2) + m_b * (Z_b - Z_{zmp}) * d^2 \Delta X_b / dt^2 \quad \dots \text{式 a 1 2}$$

- 5 同様に、 $F_x$ 、 $X_b$  以外は定数とみなして、床反力水平成分の摂動  $\Delta F_x$  と上体質点水平位置の摂動  $\Delta X_b$  の関係を前記式 0 2 x から求めると、次式が得られる。

$$\Delta F_x = m_b * d^2 \Delta X_b / dt^2 \quad \dots \text{式 a 1 3}$$

10

上体水平加速度によって発生する  $\Delta M_p$  と  $\Delta F_p$  の比である上体並進モード床反力比率  $h$  は、式 a 1 2 の右辺のうちの上体水平加速度によって発生する項（すなわち第 2 項）と式 a 1 3 との比であるから、次式が得られる。

15

$$h = (Z_b - Z_{zmp}) \quad \dots \text{式 a 1 4}$$

すなわち、上体並進モード床反力比率  $h$  は、単純化モデルの上体質点（倒立振子質点）の支点からの高さに相当する。

- 20 よって、式 a 1 2 と式 a 1 4 とより次式が得られる。

$$\Delta M_y = -m_b * \Delta X_b * (g + d^2 Z_b / dt^2) + m_b * h * d^2 \Delta X_b / dt^2 \quad \dots \text{式 a 1 5}$$

- 一方、上体質点（倒立振子質点）に作用する重力と慣性力との合力の  
25 並進力鉛直成分に釣り合う床反力鉛直成分を上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  と呼ぶ。すなわち、上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  は、次式で定義される。

192

$$F_{bz} = m_b * (g + d^2 Z_b / dt^2) \quad \dots \text{式 a 1 6}$$

そして、この式 a 1 6 と前記式 0 1 とから、上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$   
 5 は次式となる。

$$F_{bz} = F_z - m_{sup} * (g + d^2 Z_{sup} / dt^2) - m_{swg} * (g + d^2 Z_{swg} / dt^2) \quad \dots \text{式 a 1 7}$$

言い換えると、上体床反力鉛直成分は、床反力鉛直成分  $F_z$  と図 1 2  
 10 に示す前記単純化モデル（3 質点＋フライホイールのモデル）の両脚質  
 点に作用する重力と慣性力との合力の並進力鉛直成分との和に等しい。

式 a 1 6 を式 a 1 5 に代入することにより、次式が得られる。

$$\Delta M_y = -F_{bz} * \Delta X_b + m_b * h * d^2 \Delta X_b / dt^2 \quad \dots \text{式 a 1 8}$$

15

式 a 1 8 の  $\Delta M_y$  を上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$ 、  
 $\Delta X_b$  を補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  に対応させることにより  
 （式 a 1 8 の  $\Delta M_y$  に上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$ 、  
 $\Delta X_b$  に補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  を代入することにより）、次  
 20 式が得られる。

$$M_p = -F_{bz} * X_c + m_b * h * d^2 X_c / dt^2 \quad \dots \text{式 a 1 9}$$

すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 は、式 a 1 4 によつ  
 25 て求められる上体並進モード床反力比率  $h$  と式 a 1 7 によって求められ  
 る上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  を用いて、式 a 1 9 で表される。

193

また、式 a 1 3 の  $\Delta F_x$  を上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_p$  に対応させることにより、次式が得られる。

$$F_p = m_b * d^2 X_c / dt^2 \quad \dots \text{式 a 2 0}$$

5      すなわち、式 a 1 4、式 a 1 7、式 a 1 9、式 a 2 0 によって上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 が記述される。

補足すると、ここでは、上体質点位置の摂動と上体位置（上体代表点位置）の摂動は一致するものとみなしているが、厳密には、一致するとは限らない。従って、 $M_p$ 、 $F_p$  と  $X_c$  の関係を求めるためには、さらに  
10    上体質点水平位置と上体位置の幾何学的関係を表すモデルが必要である。

一方、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 は、前記上体傾斜モードにおける床反力の摂動と上体姿勢傾斜角の摂動の関係を表す。

上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 は、床反力モーメント水平成分の補正量が入力され、これに動力学的に釣り合う目標上体姿勢傾斜角  
15    の補正量を算出する。この入力（床反力モーメントの補正量）を、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ （上体姿勢角補正用摂動モデル  $M_r$  と略すこともある）と呼ぶ。また、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 の出力（目標上体姿勢傾斜角の補正量）を補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$  と呼ぶ。また、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル  
20    2 0 3 が発生する床反力水平成分を上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_r$  と呼ぶ。 $F_r$  は前述したごとく 0 である。すなわち、次式が常に成立する。

$$F_r = 0 \quad \dots \text{式 a 2 1}$$

25

上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 は、図 6 8 のように、フライ

ホイールで表される。補足すると、図68では、Y軸まわり回転のフライホイールのみを示したが、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル203は、実際には、Y軸まわり回転のフライホールだけでなく、X軸まわり回転のフラーホイールも必要とする。それらのフライホイールのイナーシャは、図12に示した前記単純化モデル（3質点モデル+フライホイール）のフライホイール  $FH_x$ 、 $FH_y$  と同じである。この上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル203のフライホイールの回転角度が補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$ 、そのフライホイールによって発生する床反力モーメント水平成分が上体姿勢傾斜角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  に相当する。なお、以下の説明では理解の便宜上、Y軸まわり回転のフライホイールを中心に説明するが、X軸まわり回転のフライホイールについても同様である。

この上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル203（より詳しくはサジタルプレーンに関するモデル）は、前記単純化モデル（3質点+フライホイールのモデル）の動力学方程式の前記式03yにおいて、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体姿勢傾斜角の摂動  $\Delta \theta_{by}$  の関係を表している。

そこで、 $M_y$ 、 $\theta_{by}$  以外は定数とみなして、床反力モーメント水平成分の摂動  $\Delta M_y$  と上体姿勢傾斜角の摂動  $\Delta \theta_{by}$  の関係を式03yから求めると、次式が得られる。

$$\Delta M_y = J * d^2 \Delta \theta_{by} / dt^2 \quad \dots \text{式 a22}$$

式 a22 の  $\Delta M_y$  を上体姿勢傾斜角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ 、 $\Delta \theta_{by}$  を補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$  に対応させることにより、次式が得られる。

195

$$M_r = J * d^2 \Delta \theta_c / dt^2$$

…式 a 2 3

すなわち、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 は、式 a 2 3 で表される。また、上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_r$  は上記したごとく式 a 2 1 のようになる ( $F_r = 0$ )。なお、上記では、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 の動力学をサジタルプレーン上で説明したが、ラテラルプレーン上での動力学も、式 a 2 3 と同じ形の式で表される。

また、逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 は、前記逆位相腕振りモードにおける床反力の摂動と逆位相腕振り角の摂動との関係を表す。

逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 は、床反力モーメント鉛直成分の補正量が入力され、これに動学的に釣り合う目標逆位相腕振り角の補正量を算出する。この入力（床反力モーメント鉛直成分の補正量）を、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  と呼ぶ。また、逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 0 3 の出力（目標逆位相腕振り角の補正量）を補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  と呼ぶ。また、逆位相腕振り角補正用摂動モデルが発生する床反力水平成分を逆位相腕振り角補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_a$  と呼ぶ。 $F_a$  は前述したごとく 0 である。すなわち、次式が常に成立する。

$$F_a = 0 \quad \dots \text{式 a 2 1 c}$$

逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 は、図 6 9 のように、フライホイールで表される。フライホイールのイナーシャは、図 1 2 に示した前記単純化モデル（3 質点モデル＋フライホイール）のフライホイール  $FH_{az}$  と同じである。この逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 のフ

ライホイールの回転角度が補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$ 、その  
 フライホイールによって発生する床反力モーメント鉛直成分が逆位相腕  
 振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  に相当する。

この逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 は、前記単純化モデル  
 5 (3 質点+フライホイールのモデル) の動力学方程式の前記式 0 3 z に  
 おいて、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_z$  と逆位相腕振り角の摂動  $\Delta \theta_{az}$   
 との関係を表している。

そこで、 $M_z$ 、 $\theta_{az}$  以外は定数とみなして、床反力モーメントの摂動  
 $\Delta M_z$  と逆位相腕振り角の摂動  $\Delta \theta_{az}$  の関係を式 0 3 z から求めると、次  
 10 式が得られる。

$$\Delta M_z = J_{az} * d^2 \Delta \theta_{az} / dt^2 \quad \cdots \text{式 a 2 2 c}$$

式 a 2 2 c の  $\Delta M_z$  を逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  
 15  $M_a$ 、 $\Delta \theta_{az}$  を補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  に対応させること  
 により、次式が得られる。

$$M_a = J_{az} * d^2 \Delta \theta_{ca} / dt^2 \quad \cdots \text{式 a 2 3 c}$$

すなわち、逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 は、式 a 2 3 c で  
 20 表される。また、逆位相腕振り角補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_r$   
 は上記したごとく式 a 2 1 c のようになる ( $F_a = 0$ )。

後述するように、S 3 5 3 6 では、最終的に、補正歩容 (より詳しく  
 5 は、単純化モデル歩容の一部の瞬時値を補正した目標瞬時値) が生成  
 (出力) される。補正歩容の目標上体姿勢傾斜角 (これを以降、補正目



標上体姿勢傾斜角と呼ぶ)は、前記求めた単純化モデル上体姿勢傾斜角の瞬時値 (S 3 5 3 2 で求めた今回歩容の現在時刻  $t$  での目標上体姿勢傾斜角の瞬時値) に前記補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$  (現在時刻  $t$  の制御周期で求められる値) を演算部 2 0 4 で加えることにより得られる。補正歩容の目標上体水平位置 (これを以降、補正目標上体水平位置と呼ぶ) は、前記求めた単純化モデル上体水平位置の瞬時値 (S 3 5 3 2 で求めた今回歩容の現在時刻  $t$  での目標上体水平位置の瞬時値) に補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  (現在時刻  $t$  の制御周期で求められる値) を演算部 2 0 5 で加えることにより得られる。また、補正歩容の目標逆位相腕振り角 (これを以降、補正目標逆位相腕振り角と呼ぶ) は、前記求めた単純化モデル逆位相腕振り角の瞬時値 (S 3 5 3 2 で求めた今回歩容の現在時刻  $t$  での目標逆位相腕振り角の瞬時値) に補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  (現在時刻  $t$  の制御周期で求められる値) を演算部 2 3 2 で加えることにより得られる。

補正歩容の目標床反力も修正される。具体的には、目標 ZMP まわりの床反力モーメント水平成分が 0 でなくなり、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分が目標値として出力される。また、目標床反力水平成分も、補正目標床反力水平成分に修正され、出力される。また、目標床反力モーメント鉛直成分も、補正目標床反力モーメント鉛直成分に修正され、出力される。

ところで、上記のごとく、補正歩容の運動は、単純化モデル歩容の運動に摂動モデルの運動 (詳しくは上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 と上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 の運動と逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 の運動) を加えた (合成した) 運動である。

一般に、ある基準運動に、ある摂動運動を加えた運動が発生する床反力は、基準運動が発生する床反力 (運動によって発生する重力と慣性力

に釣り合う床反力)と摂動運動によって発生する床反力の摂動分の和で近似される。

また、上体傾斜モードが発生する床反力水平成分、上体傾斜モードが発生する床反力モーメント鉛直成分、逆位相腕振りモードが発生する床反力水平成分および逆位相腕振りモードが発生する床反力モーメント水平成分がいずれも0であることを考慮すると、補正歩容の運動に逆フルモデル201上で釣り合う床反力モーメントに補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  と補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  とを加えたものが補正目標床反力モーメントに一致する(前記A1の条件を満たす)ためには、以下の3つの式を満足しなければならない。

$$\begin{aligned}
 & \text{フルモデル床反力モーメント水平成分 } M_{fullxy} \\
 & + \text{上体水平位置補正用摂動モデルモーメント } M_p \\
 & + \text{上体姿勢傾斜角補正用摂動モデルモーメント } M_r \\
 15 \quad & + \text{補償全床反力モーメント水平成分 } M_{dmdxy} \\
 & = \text{補正目標床反力モーメント水平成分}
 \end{aligned}$$

…式 h 5

$$\begin{aligned}
 & \text{フルモデル床反力水平成分 } F_{full} \\
 20 \quad & + \text{上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分 } F_p \\
 & = \text{補正目標床反力水平成分}
 \end{aligned}$$

…式 h 6

$$\begin{aligned}
 & \text{フルモデル床反力モーメント鉛直成分 } M_{fullz} \\
 25 \quad & + \text{上体水平位置補正用摂動モデルモーメント鉛直成分 } M_{pz} \\
 & + \text{逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント鉛直成分 } M_{az}
 \end{aligned}$$

+補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$   
 = 補正目標床反力モーメント鉛直成分

…式 h1006

ただし、上体水平位置補正用摂動モデルモーメント鉛直成分  $M_{pz}$  は、  
 5 上体水平位置補正用摂動モデルの運動によって逆フルモデル201上で  
 発生する床反力モーメント鉛直成分である。また、式 h5、式 h100  
 6 のモーメントは、元の（単純化モデルの）目標 ZMP まわりのモーメ  
 ントである。

また、補正歩容の真の ZMP は、補正目標床反力モーメントを目標床  
 10 反力鉛直成分で割った値だけ、単純化モデル歩容の目標 ZMP（理想目  
 標 ZMP）からずれた点に変更される。

補正歩容の真の ZMP = 目標 ZMP

+ 補正目標床反力モーメント / 目標床反力鉛直成分

15

…式 h7

尚、補正歩容の真の ZMP の X 方向（前後方向）成分を算出する場  
 合には、補正目標床反力モーメントの Y 軸（左右方向軸）まわり成分  
 を用いる。また、補正歩容の真の ZMP の Y 方向成分を算出する場  
 合には、補正目標床反力モーメントの X 軸（前後軸）まわり成分を用い  
 20 る。ただし、補正歩容の真の ZMP の Y 方向成分を算出する場合には、  
 式 h7 の右辺の「+」は「-」にしなければならない。

補足すると、補正歩容の真の ZMP まわりの補正目標床反力モーメン  
 ト鉛直成分を算出するようにしても良い。

補正歩容の真の ZMP まわりの補正目標床反力モーメント鉛直成分は、  
 25 元の目標 ZMP まわりのモーメントに補正歩容の真の ZMP と目標 ZMP  
 の差と式 h6 で求めた補正目標床反力水平成分との外積を加えたもの

200

となる。

式 h7 から求められる補正歩容の真の ZMP は、ZMP 許容範囲内になければならない。これを ZMP 制約条件と呼ぶ。

また、補正目標床反力水平成分は、歩容補正用（フルモデル補正用）  
5 の床反力水平成分許容範囲内になければならない。これを床反力水平成分制約条件と呼ぶ。

また、補正目標床反力モーメント鉛直成分は、歩容補正用（フルモデル補正用）の床反力モーメント鉛直成分許容範囲内になければならない。これを床反力モーメント鉛直成分制約条件と呼ぶ。

10 以上のように、補正歩容は、式 h5、式 h6、式 h1006、ZMP 制約条件（式 h7 から得られる補正歩容の真の ZMP の存在範囲条件）床反力水平成分制約条件および床反力モーメント鉛直成分制約条件を満足しなければならない。

しかし、単に、これらの式や条件を満足するだけでは、前記補正用振  
15 動モデル上体位置と前記補正用振動モデル上体姿勢傾斜角と前記補正用振動モデル逆位相腕振り角が発散してしまう。

そこで、前記上体水平位置補正用振動モデル 202 と前記上体姿勢傾斜角補正用振動モデル 203 と前記逆位相腕振り角補正用振動モデル 231 の状態量（より具体的には、補正用振動モデル上体水平位置速度、  
20 補正用振動モデル上体姿勢傾斜角・角速度、補正用振動モデル逆位相腕振り角・角速度など）を基に、これらの状態量がある所定の状態に収束する（安定する）ように、補正用振動モデル 202、203、231 の安定化制御を行う。

まず、上体水平位置補正用振動モデル 202 の安定化制御について詳  
15 細を説明する。

上体水平位置補正用振動モデル 202 を目標整定位置に収束（安定）

## 201

させるための制御則を上体水平位置補正用摂動モデル制御則 206 と呼び、この制御則が決定するフィードバック量（操作量）を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  と呼ぶ。ここで「要求値」を付けたのは、後述するように、真の ZMP が前記 ZMP 許容範囲内に存在し、かつ、床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内になるように、上記制御則で決定された値に制限が加えられて修正されるからである。制限が加えられて修正されたモーメントを、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と呼ぶ。

具体的に上体水平位置補正用摂動モデル制御則 206 としては、式 h10 10 を用いる。ただし、目標整定位置は、式 h8 で与えられる。また、 $m_{total}$  は前記ロボット総重量、 $m_b$  は前記上体質点質量（倒立振子質量）であり、 $X_{Gf}$  は、単純化モデル歩容の瞬間姿勢を基にフルモデルを用いて計算される重心水平位置、すなわち、前記逆フルモデルが算出する重心水平位置である。また、 $K_{pp}$ 、 $K_{pv}$  はフィードバック制御のゲインである。

$$\text{目標整定位置} = -m_{total}/m_b * (X_{Gf} - X_{Gs}) \quad \dots \text{式 h8}$$

$$\begin{aligned} &\text{上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 } M_{pfdmd} \\ &= K_{pp} * (\text{補正用摂動モデル上体水平位置 } X_c - \text{目標整定位置}) \\ &+ K_{pv} * \text{補正用摂動モデル上体水平速度 } dX_c/dt \\ &- \text{補正用摂動モデル上体水平位置 } X_c * \text{上体床反力鉛直成分 } F_{bz} \end{aligned} \quad \dots \text{式 h10}$$

上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  の X 軸（前後方向軸）まわり成分を求める場合には、補正用摂動モデル上

## 202

体水平位置速度および目標整定位置は Y 軸方向（左右方向）成分を用いる。

上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  の Y 軸（左右方向軸）まわり成分を求める場合には、補正用摂動モデル上  
5 体水平位置速度および目標整定位置は X 軸方向（前後方向）成分を用い、右辺第 3 項の「-」を「+」に代える。

詳細は、先に本出願人が提案した PCT/JP03/00435 に記載されているので、ここではこれ以上の説明を省略する。

次に、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 203 の安定化制御について  
10 詳細を説明する。

目標瞬時値発生部 100b が出力する基準上体姿勢傾斜角（図 57 の S3404 で求められたもの）あるいは単純化モデルによる目標上体姿勢傾斜角（図 57 の S3414 で求められたもの）に、補正目標上体姿勢傾斜角、すなわち、単純化モデルによる目標上体姿勢傾斜角に補正用  
15 摂動モデル上体姿勢傾斜角を加えたものが整定あるいは追従するように、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 203 の状態に応じて、PI 制御などのフィードバック制御則によってフィードバック量（操作量）を決定し、これを上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 203 に付加的に入力する。

この制御則を上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル制御則 207（上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 207 と略すこともある）と呼び、このフィードバック量（操作量）を上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  と呼ぶ。ここで「要求値」を付けたのは、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  と同様の理由からである。制限が加えられて修正されたモーメントを、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  と呼ぶ。  
20 25

上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$

## 203

を決定する上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル制御則 207 は、具体的には、次式のようにすれば良い。

上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$

$$\begin{aligned} 5 \quad &= K_{rp} * (\text{補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角 } \theta_c \\ &\quad - (\text{基準上体姿勢傾斜角} - \text{単純化モデルによる目標上体姿勢傾斜角})) \\ &+ K_{rv} * \text{補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角速度 } d\theta_c/dt \end{aligned}$$

…式 h11

10  ただし、 $K_{rp}$ 、 $K_{rv}$  はフィードバック制御のゲインである。

  なお、式 h11 において、(基準上体姿勢傾斜角 - 単純化モデルによる目標上体姿勢傾斜角) の代わりに 0 としてもよい。

  再び、図 66 の機能ブロック図を用いて S3536 の処理を説明すると、上記のごとく、前記上体水平位置補正用摂動モデル制御則 206 (式 h10) によって上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  が求められる。また、前記上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル制御則 207 (式 h11) によって上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が求められる。

20  次いで、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が 0 であったと仮定した場合の上体位置補正用摂動モデルの床反力推定 (算出) 値  $F0$  が  $F0$  演算部 208 により求められる。後述するように、上体水平位置補正用摂動モデル 202 には、フルモデル床反力モーメント水平成分  $M_{fullxy}$  に、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント

25  ト  $M_{pf}$  を加えられたものが入力される。したがって、 $F0$  は、上体水平位置補正用摂動モデル 202 にフルモデル床反力モーメント水平成分

## 204

Mfullxy の符号を反転させたものだけが入力された場合に上体水平位置補正用摂動モデル 202 が発生する床反力である。

具体的には、次式によって F0 が求められる。

$$5 \quad F0 = mb * d2Xc/dt2 - 1/h * Mpf \quad \dots \text{式 } h12$$

右辺第 1 項は、前回（時刻  $t - \Delta t$ ）の上体水平位置補正用摂動モデル 202 の床反力水平成分を表す。

右辺第 2 項は、前回の上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf によって、上体水平位置補正用摂動モデル 202 に直接的に発生した（すなわち直達項の）床反力水平成分を表す。

すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル 202 の前回の上体質点水平加速度に上体質点の質量 mb を乗じた値から、前回の上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf を上体並進モード床反力比率 h  
15 で割った値を減じることによって、Mpf が 0 であったと仮定した場合の上体位置補正用摂動モデルの床反力 F0 の推定値が求められる。

次に、前記制約（床反力水平成分制約条件および ZMP 制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpf dmd に一致  
20 させ、かつ、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf を、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mrf dmd に一致させると共に、目標 ZMP まわりの目標床反力モーメント水平成分としてのコンプライアンス制御用目標床反力モーメントを補償全床反力モーメント水平成分 Mdmdxy と Mpf と Mrf との総和に一致させたと  
25 仮定した場合に、目標 ZMP まわりに発生する床反力モーメント水平成分 Min が Min 演算部 209 により求められる。この床反力モーメント



## 205

水平成分を無制限時補正目標床反力モーメント水平成分  $Min$  と呼ぶ。  
 無制限時補正目標床反力モーメント水平成分  $Min$  は、次式によって求められる。

$$5 \quad Min = Mpfdmd + Mrfdmd + Mdmdxy \quad \cdots \text{式 } h13$$

すなわち、無制限時補正目標床反力モーメント水平成分  $Min$  は、上  
 体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  と上体  
 姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  と補償  
 10 全床反力モーメント水平成分  $Mdmdxy$  とを加算することにより得られ  
 る。

次いで、前記制約（床反力水平成分制約条件および Z M P 制約条件）  
 を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mpf$  を  
 上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  に一  
 15 致させ、かつ、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mrf$   
 を、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$   
 に一致させると共に、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水  
 平成分を補償全床反力モーメント水平成分  $Mdmdxy$  と  $Mpf$  と  $Mrf$  との  
 総和に一致させたと仮定した場合に、発生する床反力水平成分  $Fin$  が  
 20  $Fin$  演算部 210 により求められる。この床反力水平成分を無制限時補  
 正目標床反力水平成分  $Fin$  と呼ぶ。

補正目標床反力水平成分は、前記式  $h6$  によって得られるが、前述の  
 ごとく、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 203 の挙動によって上体姿  
 勢傾斜角補正用摂動モデル 203 には床反力水平成分は発生しない、す  
 25 なわち  $Fr$  は 0 である。したがって、無制限時補正目標床反力水平成分  
 $Fin$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mpf$  が 0 で

## 206

あったと仮定した場合の補正目標床反力水平成分に、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を 0 から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に変更したことによって増加する床反力水平成分を加えたものになる。

- 5       ところで、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を 0 から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に変更したことによって増加する床反力水平成分は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  を上体並進モード床反力比率  $h$  で割った値になる。
- 10       したがって、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  は、式 h 1 5 に示すように、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  を上体並進モード床反力比率  $h$  で割った値に、前記求めたフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を加算し、さらに、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が 0 であったと仮定した場合の上体
- 15       位置補正用摂動モデルの床反力の算出値  $F_0$  を加算することによって得られる。

$$F_{in} = 1/h * M_{pfdmd} + F_{full} + F_0 \quad \cdots \text{式 h 1 5}$$

- 20       次いで、制限手段（制限処理部）211によって、無制限時補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{in}$  と無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  とから、これらに制限を加えた値である（目標ZMPまわりの）制限補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  が決定される。本実施形態では、コンプライアンス制御用目
- 25       標床反力モーメント水平成分は、制限補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{ltd}$  に一致し、補正歩容の床反力水平成分は制限補正目標床反力水

## 207

平成分  $F_{ltd}$  に一致する。

制限補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とは、補正歩容（コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分を含む）の真の ZMP が前記 ZMP 許容範囲内に存在し、かつ、補正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内になるように決定される。すなわち、 $M_{ltd}$  および  $F_{ltd}$  は ZMP 制約条件および床反力水平成分制約条件を満足するように決定される。

また、上記制約条件下で、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_p$  は、可能な限り、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。同様に、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_r$  は、可能な限り上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。これにより、前記補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  と前記補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$  とを安定化し、発散することを防止する。

制限手段（制限処理部）211の詳細は、先に本出願人が提案した PCT/JP03/00435に記載されているので、ここではこれ以上の説明を省略する。

次いで、以下の式により、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$ 、および上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  がそれぞれ  $M_{pf}$  演算部212、 $M_{rf}$  演算部213により求められる。

$$M_{pf} = (F_{ltd} - F_{full} - F_0) * h \quad \cdots \text{式 h20}$$

$$M_{rf} = M_{ltd} - M_{pf} - M_{dmdxy} \quad \cdots \text{式 h21}$$

すなわち、Mpf 演算部 212 では、制限補正目標床反力水平成分 Fltd から、フルモデル床反力水平成分 Ffull を減じ、Mp が 0 であったと仮定した場合の上体位置補正用摂動モデル 202 の床反力の算出値 F0 を減じた値に、上体並進モード床反力比率 h を乗じることにより、前記上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf が得られる。また、Mrf 演算部 213 では、目標 ZMP まわりの制限補正目標床反力モーメント水平成分 Mltd から前記上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf と補償全床反力モーメント水平成分 Mdmdxy とを減じることにより、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf が得られる。

次いで、以下の式により、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント Mp、および上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル床反力モーメント Mr が求められる。

$$M_p = M_{pf} - M_{full} \quad \cdots \text{式 h22}$$

$$M_r = M_{rf} \quad \cdots \text{式 h23}$$

すなわち、Mp 演算部 214 にて、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf からフルモデル床反力モーメント水平成分 Mfullxy を減じることにより、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント Mp が得られる。また、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル床反力モーメント Mr は、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf と同一の値とされる。

次いで、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント Mp が上体位置補正用摂動モデル 202 に入力され、その入力された床反力モーメント

## 209

ントに釣り合う補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  が算出される。

また、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_r$  が上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 203 に入力され、その入力された床反力モーメント水平成分に釣り合う補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$  が  
5 算出される。

次いで、演算部 205, 204 にて、それぞれ次式 h24、式 h25 に従って、補正目標上体水平位置と補正目標上体姿勢傾斜角とが決定され、これらがそれぞれ上体水平位置姿勢の最終的な目標瞬時値として出力される。

10

補正目標上体水平位置

= 単純化モデル上体水平位置 + 補正用摂動モデル上体位置  $X_c$

…式 h24

15 補正目標上体姿勢傾斜角

= 単純化モデル上体姿勢傾斜角 + 補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$

…式 h25

すなわち、単純化モデル上体水平位置に補正用摂動モデル上体位置  
20  $X_c$  を加えることにより補正目標上体水平位置が得られ、これが最終的な目標上体水平位置として出力される。また、単純化モデル上体姿勢傾斜角に補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$  を加えることにより補正目標上体姿勢傾斜角が得られ、これが最終的な目標上体姿勢傾斜角として出力される。

25 また、目標 ZMP まわりのコンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分として制限補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{ltd}$  が出

## 210

力されると共に、補正目標床反力水平成分として制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  が出力される。

すなわち、次式 h 2 6、式 h 2 7に従って、補正目標床反力水平成分と目標 Z M P まわりの補正目標床反力モーメント水平成分とがそれぞれ、  
5 床反力水平成分および床反力モーメント水平成分（目標 Z M P まわりのモーメント水平成分）の最終的な目標瞬時値として決定され、これらが出力される。

コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分  
10 =制限補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{ltd}$   
…式 h 2 6

補正目標床反力水平成分  
=制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$   
15 …式 h 2 7

S 3 5 3 6における以上までの処理は、本願出願人による P C T / J P 0 3 / 0 0 4 3 5 の通りであるので、ここでの説明は以上に留める。

本実施形態ではさらに、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  
20 決定部 2 3 0において、逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 への入力である逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  と目標床反力モーメント鉛直成分が決定される。次いで、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  は、逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 に入力され、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  が決定される。

25 補足すると、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 2 3 0 は、目標瞬時値発生部 1 0 0 b が出力する基準逆位相腕振り角（図 5

## 2 1 1

7 の S 3 4 0 4 で求められたもの)あるいは単純化モデルによる目標逆位相腕振り角 (図 5 7 の S 3 4 1 4 で求められたもの)に、補正目標逆位相腕振り角、すなわち、単純化モデルによる目標逆位相腕振り角に補正用摂動モデル逆位相腕振り角を加えたものが整定あるいは追従するように、逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 の状態に応じて、P I 制御などのフィードバック制御則によってフィードバック量 (操作量) を決定し、これを逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 に付加的に入力する。

この制御則を逆位相腕振り角補正用摂動モデル制御則と呼び、このフィードバック量 (操作量) を逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  と呼ぶ。ここで「要求値」を付けたのは、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdm}$  と同様の理由からである。制限が加えられて修正されたモーメントを、逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{af}$  と呼ぶ。なお、本実施形態では、この  $M_{af}$  が、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  として、逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 に入力される。

逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  を決定する逆位相腕振り角補正用摂動モデル制御則は、具体的には、次式のようにすれば良い。

20

逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$

$= K_{ap} * ( \text{補正用摂動モデル逆位相腕振り角 } \theta_{ca}$

$- ( \text{基準逆位相腕振り角} - \text{単純化モデルによる目標逆位相腕振り角} ) )$

25  $+ K_{av} * \text{補正用摂動モデル逆位相腕振り角速度 } d\theta_{ca}/dt$

…式 h 3 0

## 2 1 2

ただし、 $K_{ap}$ 、 $K_{av}$  はフィードバック制御則のゲインである。

なお、式 h 3 0 において、（基準逆位相腕振り角－単純化モデルによる目標逆位相腕振り角）の代わりに 0 としてもよい。

- 5      以下に、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 2 3 0 の動作についてその機能ブロック図である図 7 0 を用いて詳細を説明する。

まず、上記のごとく、前記逆位相腕振り角補正用摂動モデル制御則 2 3 0 a（式 h 3 0）によって逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  が求められる。

- 10      次いで、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 を用いた上体水平位置補正に起因する床反力モーメント鉛直成分摂動量  $M_{pz}$  が、上体水平位置補正に起因する床反力モーメント鉛直成分摂動量算出部 2 3 0 b によって求められる。

具体的には、次式によって求められる。

15

$M_{pz} =$ （単純モデル上体質点位置

+ 補正用摂動モデル上体位置  $X_c$ －目標 Z M P）

\*（単純モデル上体質点水平加速度

+ 補正用摂動モデル上体加速度  $d^2X_c/dt^2$ ）

20

－（単純モデル上体質点位置 － 目標 Z M P）

\*（単純モデル上体質点水平加速度）

…式 h 3 1

あるいは、上式を近似した以下の式を用いても良い。

- 25       $M_{pz} \approx$  補正用摂動モデル上体位置  $X_c$

\*（単純モデル上体質点水平加速度



2 1 3

+ 補正用摂動モデル上体加速度  $d^2X_c/dt^2$ )

+ (単純モデル上体質点位置 - 目標 Z M P)

\* 補正用摂動モデル上体加速度  $d^2X_c/dt^2$ )

…式 h 3 2

5

次に、前記床反力モーメント鉛直成分制約条件を無視して、逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{af}$  を、逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  に一致させると共に、目標 Z M P まわりの目標床反力モーメント鉛直成分としてのコンプライ

10 アンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分を補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmz}$  と  $M_{af}$  と  $M_{fullz}$  と  $M_{pz}$  との総和に一致させたと仮定した場合に、目標 Z M P まわりに発生する床反力モーメント鉛直成分  $M_{inz}$  が演算部 2 3 0 c により求められる。この床反力モーメント鉛直成分を無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{inz}$  と呼ぶ。無制

15 限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{inz}$  は、次式によって求められる。

$$M_{inz} = M_{afdm} + M_{dmz} + M_{fullz} + M_{pz} \quad \dots \text{式 h 3 3}$$

20 すなわち、無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{inz}$  は、逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  と補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmz}$  とフルモデル床反力モーメント鉛直成分を  $M_{fullz}$  と上体水平位置補正用摂動モデルモーメント鉛直成分  $M_{pz}$  とを加算することにより得られる。

25 次の、制限手段 (制限処理部) 2 3 0 d によって、無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{inz}$  から、これに制限を加えた値である

## 2 1 4

(目標 Z M P まわりの) 制限補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{ltdz}$  が決定される。本実施形態では、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分は、制限補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{ltdz}$  に一致する。

- 5 制限補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{ltdz}$  は、床反力モーメント鉛直成分許容範囲内になるように決定される。すなわち、 $M_{ltdz}$  は床反力モーメント鉛直成分制約条件を満足するように決定される。

- また、上記床反力モーメント鉛直成分制約条件下で、逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{af}$  は、可能な限り、逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  に一致または近い値になるように決定される。これにより、前記補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  を安定化し、発散することを防止する。

制限手段 (制限処理部) 230d は、次式に示す飽和特性を持った関数である。

15

$Minz > \text{床反力モーメント鉛直成分許容範囲上限値である場合}$

$$M_{ltdz} = \text{床反力モーメント鉛直成分許容範囲上限値}$$

$Minz < \text{床反力モーメント鉛直成分許容範囲下限値である場合}$

$$M_{ltdz} = \text{床反力モーメント鉛直成分許容範囲下限値}$$

- 20  $\text{床反力モーメント鉛直成分許容範囲下限値} \leq Minz$ 、且つ、 $Minz \leq \text{床反力モーメント鉛直成分許容範囲上限値である場合}$

$$M_{ltdz} = Minz$$

……式 h 3 4

- 25 次いで、以下の式により、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  (=逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{af}$ ) が

215

Maf 演算部 230e により求められる。

$$Ma = Mltdz - (Mdmdz + Mfullz + Mpz) \quad \dots \text{式 h35}$$

- 5      すなわち、Maf 演算部 230e では、制限補正目標床反力モーメント鉛直成分 Mltdz から、補償全床反力モーメント鉛直成分 Mdmdz とフルモデル床反力モーメント鉛直成分 Mfullz と上体水平位置補正用摂動モデルモーメント鉛直成分 Mpz とを減じることによって、逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント Maf としての逆位相腕振り角
- 10    補正用摂動モデルモーメント Ma が得られる。

一方、目標 ZMP まわりのコンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分として制限補正目標床反力モーメント鉛直成分 Mltd が出力される。

- すなわち、次式 h35 に従って、目標 ZMP まわりの補正目標床反力
- 15    モーメント鉛直成分が床反力モーメント鉛直成分（目標 ZMP まわりのモーメント鉛直成分）の最終的な目標瞬時値として決定され、これらが出力される。

コンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分

- 20    = 制限補正目標床反力モーメント鉛直成分 Mltdz

…式 h36

- 以上のごとく、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 2
- 30 の処理が行われた後、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント
- 25    Ma は、図 66 の逆位相腕振り角補正用モデル 231 に入力され、その入力された逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント Ma に釣り合う

## 2 1 6

補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  が、式 a 2 3 c を用いて（積分することによって）算出される。

次いで、演算部 2 3 2 にて、次式 h 3 7 に従って、補正目標逆位相腕振り角が決定され、これが逆位相腕振り角の最終的な目標瞬時値として

5 出力される。

補正目標逆位相腕振り角

= 単純化モデル逆位相腕振り角

+ 補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$

10

…式 h 3 7

すなわち、単純化モデル逆位相腕振り角に補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  を加えることにより補正目標逆位相腕振り角が得られる、これが最終的な目標逆位相腕振り角として出力される。

15 以上のごとく、S 3 5 3 6 の歩容補正が行われる。

尚、補足すると、本実施形態は、フィードフォワード型の補正であり、また、摂動動力学モデルは厳密モデルではない。このため、上記のごとく式 h 5、式 h 6 および式 h 1 0 0 6 を満足するように歩容を補正しても、厳密には、動力学平衡条件を満足するのではなく、近似的に

20 動力学平衡条件を満足する。

また、本実施形態では、例えば 1 歩の歩容の終端（今回歩容終端）において、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 と上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 と逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 との状態量、例えば上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の上体質点（倒立振子質点）の水平位置や、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 のフライホールの回転角や、逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 のフライホー

25

## 217

ルの回転角は、単純化モデル200の状態量として追加される。つまり、  
今回歩容終端における単純化モデル200の状態量が、上体水平位置補  
正用摂動モデル202の上体運動と上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル2  
03と逆位相腕振り角補正用摂動モデル231との状態量を加えたもの  
5 に修正される。さらに、各摂動モデル202, 203, 231の状態量  
は初期化される（例えば上体水平位置補正用摂動モデル202の上体質  
点（倒立振子質点）の水平位置や、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル2  
03のフライホールの回転角や、逆位相腕振り角補正用摂動モデル23  
1のフライホールの回転角が0にリセットされる）。そして、上記の如  
10 く修正した単純化モデル200の状態量を次回歩容の初期値として、次  
回歩容の生成が行なわれると共に、各摂動モデル202, 203, 23  
1による補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$ 、補正用摂動モデル上体姿  
勢傾斜角  $\theta_c$  および補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  の算出が行な  
われる。これにより各摂動モデル202, 203, 231の挙動の安定  
15 性をより一層高めることができる。なお、上記のような単純化モデル2  
00の状態量の修正は、歩容の生成途中で適宜行なってもよい。逆に、  
上記のような単純化モデル200の状態量の修正や摂動モデルのリセッ  
トを、歩容の生成途中に行なわなくてもよい。

また、上記のような単純化モデル200の状態量の修正は、後述する  
20 第4、第5実施形態においても同様に行なわれる。

本実施形態では、前記復元条件すべてを満足する。したがって、前記  
第2実施形態と同様の作用効果を奏することができる。

さらに、第2実施形態の作用効果に加え、前記復元条件を満足するよ  
うに上体水平位置、上体姿勢傾斜角および逆位相腕振り角を決定する際  
25 に、演算量を比較的少ないものとすることができる。

以上説明した第3実施形態は、本発明のうちの第1～第10発明、第

## 218

1 2 ～第 1 5 発明、第 2 0 ～第 2 2 発明、第 2 4 ～第 2 6 発明、第 2 8  
～第 3 0 発明の実施形態になっている。この場合、第 3 実施形態におけ  
る床反力モーメント鉛直成分 ( $M_{dmdz}$  を付加した床反力モーメント鉛  
直成分) が制御対象量、上体ヨー角偏差および／または上体ヨー角速度  
5 偏差がロボット 1 の状態量の偏差、 $M_{dmdz}$  が補償床反力モーメントに  
相当する。また、第 3 実施形態における歩容生成用 (フルモデル補正  
用) の床反力モーメント鉛直成分許容範囲 [ $M_{zmin}, M_{zmax}$ ] が制限対象  
量の許容範囲に相当する。また、単純化モデル歩容の運動成分が目標運  
動の仮瞬時値に対応し、これを S 3 5 3 6 で修正したものが目標運動の  
10 瞬時値に対応する。また、発明における動力学モデルは、フルモデル  
(逆位相腕振り角補正用摂動モデルを含む) が相当する。そして、前記  
逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  が第 1 0 発明における  
モーメント修正操作量と、第 2 2 発明における摂動モデル操作量とに相  
当し、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  が第 2 発明における目標  
15 運動の仮瞬時値の修正量と、第 2 2 発明における目標運動の補正量とに  
相当する。さらに、第 3 実施形態における、無制限時補正目標床反力モ  
ーメント鉛直成分  $Minz$  が第 2 6 発明における制限対象量の推定値に、  
逆位相腕振り角補正用モデル安定化モーメント  $M_{afdm}$  が第 3 発明に  
おけるモデル補正床反力モーメントと第 2 4 発明における摂動モデル操作  
20 量の要求値とに相当する。さらに、第 3 実施形態におけるフルモデル床  
反力モーメント鉛直成分  $M_{fullz}$  に上体水平位置補正に起因する床反力  
モーメント鉛直成分  $M_{pz}$  を加えたものが、目標運動の仮瞬時値にフル  
モデル (動力学モデル) 上でほぼ釣り合う床反力モーメントの鉛直成分  
に相当する。そして、これに図 7 0 の演算部 2 3 0 c で  $M_{dmdz}$  を加え  
25 たものが第 2 0 発明におけるモデル制限対象量瞬時値に相当する。

なお、前記第 3 実施形態においては、 $M_{afdm}$  は定常的に 0 となるも

のでは無いが、これを定常的に0とすれば、本発明のうちの第23発明の実施形態が構成されることとなる。

- 5 次に本発明の第4実施形態を以下に図71及び図72を参照して説明する。第4実施形態に係る装置の補正手法は、前記第3実施形態のものと歩容生成装置100の処理（図65のS3536の処理）のみが相違するものであり、フルモデルフィードバック補正型である。また、逆動力学フルモデル（逆フルモデル）を用いる手法で、かつ単純化モデル歩容の入力を補正しない手法であり、かつ摂動モデルを用いる手法である。

図71は、この第4実施形態に係る装置の動作、具体的には、図65のフローチャートのS3536の歩容の修正手法を説明する機能ブロック図である。ただし、図71の単純化モデル200は、前記第3実施形態と同様、単に動力学モデルだけでなく、図65のS3510からS3532の処理、すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表す。したがって、図71において、単純化モデル200から先の部分がS3536の処理に相当する。なお、図71の機能部分のうち、第3実施形態に係る図66と同一の機能分については、図66と同一の参照符号を用い、詳細な説明を省略する。

- 20 S3536の処理以外の構成は第3実施形態と同じであるので説明を省略し、以下に図71を用いてS3536の処理を詳細に説明する。

S3536では、まず、前述のごとく図65のS3532で求めた単純化モデル歩容の目標上体水平位置の瞬時値（現在時刻 $t$ の制御周期で求めた仮瞬時値）に、前回制御周期（時刻 $t - \Delta t$ ）で後述のごとく算出した補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  を演算部205により加えることにより、最終的な目標上体水平位置（補正目標上体水平位置）が求

## 220

められる。また、図65のS3532で求めた単純化モデル歩容の目標  
上体姿勢傾斜角の瞬時値（現在時刻 $t$ の制御周期で求めた仮瞬時値）に、  
前回制御周期（時刻 $t - \Delta t$ ）で算出した後述する補正用摂動モデル上  
体姿勢傾斜角 $\theta_c$ を演算部204により加えることにより、最終的な目  
5 標上体姿勢傾斜角（補正目標上体姿勢傾斜角）が求められる。また、図  
65のS3532で求めた単純化モデル歩容の目標逆位相腕振り角の瞬  
時値（現在時刻 $t$ の制御周期で求めた仮瞬時値）に、前回制御周期（時  
刻 $t - \Delta t$ ）で算出した後述する補正用摂動モデル逆位相腕振り角 $\theta_{ca}$   
を演算部232により加えることにより、最終的な目標逆位相腕振り角  
10 （補正目標逆位相腕振り角）が求められる。

そして、これらの補正目標上体水平位置、補正目標上体姿勢傾斜角お  
よび補正目標逆位相腕振り角が、それぞれ上体水平位置、上体姿勢傾斜  
角および逆位相腕振り角の最終的な目標瞬時値として出力される。

すなわち、前記式h24、式h25、式h37により、補正目標上体  
15 水平位置と補正目標上体姿勢傾斜角と補正目標逆位相腕振り角とが求め  
られる。

次いで、上記の如く単純化モデル歩容を補正して得られた目標上体水  
平位置（補正目標上体水平位置）、目標上体姿勢傾斜角（補正目標上体  
姿勢傾斜角）、目標逆位相腕振り角（補正目標逆位相腕振り角）、および  
20 前述のごとく得られた単純化モデル歩容の目標重心位置、目標足平位置  
姿勢、目標腕姿勢などの運動変数の瞬時値と目標ZMPの瞬時値とを、  
前記逆動力学フルモデル201に入力し、その入力された運動変数で表  
される運動に釣り合う（すなわち運動によって逆フルモデル201が発  
生する）床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメント（水平  
25 成分および鉛直成分）とが算出される。従って、本実施形態では、逆フ  
ルモデル201には、単純化モデル上体水平位置、上体姿勢傾斜角、逆



## 2 2 1

位相腕振り角に加えて、補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  と補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$  と補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  とが追加的に入力される。以降、第3実施形態と同様、逆フルモデル 2 0 1 により算出された床反力水平成分、床反力モーメント水平成分、床反力モーメント鉛直成分、をそれぞれフルモデル床反力水平成分  $F_{fullxy}$ 、フルモデル床反力モーメント水平成分  $M_{fullxy}$ 、フルモデル床反力モーメント鉛直成分  $M_{fullz}$  と呼ぶ。

フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  は、補正目標床反力水平成分（現在時刻  $t$  における床反力水平成分の最終的な目標瞬時値）として出力される。

すなわち、以下の式により、補正目標床反力水平成分が決定されて出力される。

補正目標床反力水平成分＝フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$

…式 h 4 8

以上の処理からわかるように、本実施形態では、フルモデル補正歩容は、単純化モデル歩容に上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の挙動と上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 の挙動と逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 の挙動とを加えたものになる。さらに、上体傾斜モードが発生する床反力水平成分および逆位相腕振りモードが発生する床反力水平成分がいずれも 0であることを考慮すると、次式が成立する。ただし、単純化モデル床反力水平成分は、単純化モデル歩容の運動によって発生する床反力を逆フルモデル 2 0 1 を用いて算出したものの並進力水平成分である。

2 2 2

フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$   
 = 単純化モデル床反力水平成分  
 + 上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_p$

…式 h 5 1

5

次いで、上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 により、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  が決定される。本実施形態における上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 は、特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号で本願出願人が提案した如く、設定される。例えば、次式のように該制御則 2 0 6 が決定される。

10

上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$   
 =  $K_{pg} * \text{重心差} + K_{vg} * \text{補正用摂動モデル上体水平速度 } dX_c/dt$

…式 h 5 2

15   ただし、重心差は、次式で求められる。

重心差 = フルモデル重心水平位置 - 単純化モデル重心水平位置

…式 h 5 3

式 h 5 2 における  $K_{pg}$ 、 $K_{vg}$  はフィードバック制御則のゲインであり、フルモデル重心水平位置、単純化モデル重心水平位置および補正用摂動モデル上体水平速度  $dX_c/dt$  は、それぞれ、前回（時刻  $t - \Delta t$ ）に後述のごとく算出したフルモデル歩容瞬時値の重心水平位置、単純化モデル歩容瞬時値の重心水平位置（単純化モデル歩容の瞬間姿勢を基に単純化モデルを用いて計算される重心水平位置  $XGs$ ）、および補正用摂動モデル上体水平速度  $dX_c/dt$  である。

25

即ち、フルモデル重心水平位置から単純化モデル重心水平位置を減算

## 2 2 3

して得た重心差と摂動モデルの状態量のひとつである摂動モデル上体速度とに基づいて摂動モデル制御用フィードバック量（操作量）を演算するようにした。かかる摂動モデル制御則により、前記重心差の時間的平均値を、ほぼ 0 に制御することができる。

- 5      次いで、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル制御則 2 0 7 により、上体姿勢補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が決定される。これは、第 3 実施形態と同様の制御則を用いれば良い。従って、該制御則 2 0 7 としては、例えば前記式 h 1 1 が用いられる。

- 10      次いで、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  が  $Min$  演算部 2 0 9 により求められる（推定される）。無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、第 3 実施形態と同様、前記制約（ZMP 制約条件および床反力水平成分制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致させ、かつ、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  を、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致させると共に、目標 ZMP まわりの目標床反力モーメントとしてのコンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分を補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  と  $M_{pf}$  と  $M_{rf}$  との総和に一致させた場合に、目標 ZMP まわりに発生する床反力  
15      モーメント水平成分である。

- 20      無制限時補正目標床反力モーメント水平成分  $Min$  は、第 3 実施形態と同様、前記式 h 1 3 の演算によって求められる。すなわち、無制限時補正目標床反力モーメント水平成分  $Min$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  と上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  と補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  とを加算することにより得られる。
- 25

さらに、Fin 演算部 210 により、無制限時補正目標床反力水平成分 Fin も求められる（推定される）。無制限時補正目標床反力水平成分 Fin は、第 3 実施形態と同様、前記制約（ZMP 制約条件および床反力水平成分制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd に一致させ、かつ、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf を、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mrfdmd に一致させると共に、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分を補償全床反力モーメント水平成分 Mdmdxy と Mpf と Mrf との総和に一致させたとした場合に、逆フルモデル 201 が発生する床反力水平成分（Ffull に相当）である。

無制限時補正目標床反力水平成分 Fin は、第 3 実施形態とは異なり、次式により求められる。

15 無制限時補正目標床反力水平成分 Fin

=フルモデル床反力水平成分 Ffull

+ 1/h

\* (上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd  
- 上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf)

20

…式 h5 4

ただし、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf は前回値（時刻  $t - \Delta t$  での値）が用いられる。すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd と上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf の差を求め、上体水平位置補正用摂動モデルの入力を前記差だけ増加させることに起因するフルモデル床反力水平成分 Ffull の増加量を、前記差を上体並進モード床反力比率 h

## 2 2 5

で割ることにより推定する。さらに、これにフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を加えることにより、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  が推定される。

次いで、第3実施形態と同様の制限手段（制限処理部211）によって、無制限時補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{in}$  と無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  とから、前記制約（ZMP制約条件および床反力水平成分制約条件）を満足するように、これらに制限を加えた値である（目標ZMPまわりの）制限補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とが決定される。この処理手法は、第3実施形態と同一である。

本実施形態においても、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分は制限補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{ltd}$  に一致され、また、補正目標床反力水平成分は制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  にほぼ一致するので、上記のごとく制限補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とを決定することによって、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分および補正目標床反力水平成分は、それぞれZMP制約条件および床反力水平成分制約条件をほぼ満足する。

次いで、 $M_{pf}$  演算部215によって、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が求められる。さらに詳細には、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  からフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を減じた値にゲイン  $K_c$  を乗じたものを積分器215aにて積分し、さらに得られた積分値に上体並進モード床反力比率  $h$  を乗じることにより、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が求められる。すなわち、次式により、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が得られる。

2 2 6

$$M_{pf} = h * \int K_c(F_{ltd} - F_{full})dt \quad \dots \text{式 } h55$$

次いで、Mrf 演算部 2 1 4 によって、制限補正目標床反力モーメント  
 5 水平成分 Mltd から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  
 Mpf と補償全床反力モーメント水平成分 Mdmdxy とを減じることによ  
 り、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf が求めら  
 れる。すなわち、前記式 h 2 1 により、上体姿勢傾斜角補正用摂動モ  
 デル安定化モーメント Mrf が得られる。

10 さらに、前記式 h 2 3 により、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル床反  
 力モーメント Mr が決定される。すなわち、Mrf 演算部 2 1 4 の出力で  
 ある上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf がそのま  
 ま上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル床反力モーメント Mr として決定さ  
 れる。

15 次いで、次式で定義されるフルモデル床反力モーメント誤差 Merr が  
 Merr 演算部 2 1 6 により算出される。

フルモデル床反力モーメント誤差 Merr

=フルモデル床反力モーメント水平成分 Mfullxy

20 - 制限補正目標床反力モーメント水平成分 Mltd

…式 h 5 6

次いで、Mp 演算部 2 1 7 により、次式に従って、上体水平位置補正  
 用摂動モデル床反力モーメント Mp が求められる。

25

$$M_p = M_{pf} - \int K_m * M_{err} dt \quad \dots \text{式 } h57$$

## 2 2 7

すなわち、フルモデル床反力モーメント誤差  $M_{err}$  に積分ゲイン  $K_m$  を乗じた値を積分器 2 1 7 a にて積分すると共に、その積分値の符号を反転する。さらに、該積分器 2 1 7 a の出力を上体水平位置補正用摂動  
5 モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  に加えることにより、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$  が求められる。

次いで、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$  を上体位置補正用摂動モデル 2 0 2 に入力して、入力された床反力モーメント水平成分に釣り合う補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  が算出される。

10 また、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_r$  を上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2 0 3 に入力して、入力された床反力モーメント水平成分に釣り合う補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$  が算出される。

S 3 5 3 6 における以上までの処理は、P C T / J P 0 3 / 0 0 4 3  
15 5 の通りであるので、ここでの説明は以上に留める。

本実施形態ではさらに、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 2 3 0 において、逆位相腕振り角モーメント補正用摂動モデル  $M_a$  が決定される。

さらに逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  が逆位相腕振り  
20 角補正用摂動モデルに入力されて、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  が決定される。

以下に、本実施形態での逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 2 3 0 の動作についてその機能ブロック図である図 7 2 を用いて詳細を説明する。

25 まず、逆位相腕振り角補正用摂動モデル制御則により、逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  が決定される。

これは、第3実施形態と同様の制御則を用いれば良い。従って、該制御則としては、例えば前記式 h 3 0 が用いられる。

次いで、演算部 2 3 0 g において、フルモデル床反力モーメント鉛直成分  $M_{fullz}$  と補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  と逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  との和から逆位相腕振り補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  の前回値（後述する積分器の出力）を減じることによって無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{inz}$  を求める。次いで、制限手段（制限処理部）2 3 0 h において、無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{inz}$  を床反力鉛直成分モーメント許容範囲を越えないように制限を加えることにより（すなわち図示する飽和特性関数に通して）、制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{ltdz}$  を求める。次いで、フルモデル床反力モーメント鉛直成分  $M_{fullz}$  と補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  と逆位相腕振り角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  との和を制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{ltdz}$  から減じた値を積分器 2 3 0 i により、積分ゲイン  $K_a$  で積分することにより逆位相腕振り補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  を求めて、これを出力する。また、制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{ltdz}$  をコンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分として出力する。

以上のごとく、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 2 3 0 において、逆位相腕振り補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  とコンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分が決定される。

求めた補正用摂動モデル上体位置  $X_c$ 、補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$ 、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$ 、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  および逆位相腕振り補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  は、前述のごとく次回制御周期（時刻  $t + \Delta t$ ）にお



いて、前回値として用いられる。

残余の構成および処理は、第3実施形態と同一である。この第4実施形態によれば、第3実施形態と同様の作用効果を奏することができる。

以上説明した第4実施形態は、本発明のうちの第1～第10発明、第12～15発明、第20～第22発明、および第24～第30発明の実施形態になっている。この場合、第4実施形態における床反力モーメント鉛直成分 ( $M_{dmdz}$  を付加した床反力モーメント鉛直成分) が制御対象量、上体ヨー角偏差および／または上体ヨー角速度偏差がロボット1の状態量の偏差、 $M_{dmdz}$  が補償床反力モーメントに相当する。また、第4実施形態における歩容生成用（フルモデル補正用）の床反力モーメント鉛直成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  が制限対象量の許容範囲に相当する。また、単純化モデル歩容の運動成分が目標運動の仮瞬時値に対応し、これを S 3 5 3 6 で修正したものが目標運動の瞬時値に対応する。また、発明における動力学モデルは、フルモデル（逆位相腕振り角補正用摂動モデルを含む）が相当する。そして、前記逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  が第3発明におけるモデル補正床反力モーメントと第10発明におけるモーメント修正操作量と、第22発明における摂動モデル操作量とに相当し、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  が第2発明および第11発明における目標運動の仮瞬時値の修正量と、第22発明における目標運動の補正量とに相当する。さらに、第4実施形態における、無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $Minz$  が第26発明における制限対象量の推定値に、逆位相腕振り角補正用モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  が第3発明におけるモデル補正床反力モーメントと第24発明における摂動モデル操作量の要求値に相当する。さらに、第4実施形態におけるフルモデル床反力モーメント鉛直成分  $M_{fullz}$  が、目標運動の仮瞬時値にフルモデル（動力学モデル）上では

## 230

ば釣り合う床反力モーメントの鉛直成分に相当する。そして、これに図 72 の演算部 230g で  $M_{dmdz}$  を加えたものが第 20 発明におけるモデル制限対象量瞬時値に相当する。また、第 4 実施形態では、第 27 発明の如く、目標運動の補正量（補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$ ）が動力学モデルであるフルモデルに追加的に入力される。

なお、前記第 4 実施形態においては、 $M_{afdm}$  は定常的に 0 となるものではないが、これを定常的に 0 とすれば、本発明のうちの第 23 発明の実施形態が構成されることとなる。

10

次に、本発明の第 5 実施形態を図 73 および図 74 を参照して説明する。第 5 実施形態は、前記第 3 および第 4 実施形態で用いた逆動力学フルモデル（逆フルモデル）201 に代えて、順動力学モデル（より正確には擬似順動力学モデル）を用いて歩容を修正しつつ生成する手法である。

15

図 73 は、この第 5 実施形態に係る装置の動作を説明する機能ブロック図である。同図 73 に示すように、本実施形態では、擬似順フルモデル（擬似順動力学フルモデル）222 を備えている。

この擬似順フルモデル 222 は、上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$ 、上体姿勢傾斜角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$ 、逆位相腕振り角安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$ 、目標 ZMP、目標床反力鉛直成分、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  および補償全床反力モーメント鉛直成分  $M_{dmdz}$  と、目標足平位置姿勢および目標腕姿勢など上体 3 を除く部位の運動状態とを入力として、目標上体鉛直位置、目標上体水平位置、目標上体姿勢傾斜角、目標逆位相腕振り角、目標 ZMP まわりの目標床反力モーメントとしてのコンプライアンス制御用目

25

## 2 3 1

標床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）、および目標床反力水平成分を出力するモデルである。なお、擬似順フルモデル 2 2 2 の目標値入力は、前記図 6 3 を参照して説明した如く、歩容パラメータ決定部 1 0 0 a で決定される歩容パラメータを基に、目標瞬時値発生部 1 0 0 b により生成される。

上記擬似順フルモデル 2 2 2 は、具体的には図 7 4 の機能ブロック図で表され、図 7 4 の破線で囲った部分が擬似順フルモデル 2 2 2 に相当する。なお、この機能ブロック図で前記第 4 実施形態の図 7 1 と同一機能部分については、図 7 1 と同一の参照符号を用いている。

- 10      ここで、同図 7 4 の単純化モデル 2 0 0 は、単に動力学モデルだけでなく、前述の図 6 5 の S 3 5 1 0 から S 3 5 3 2 の処理、すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表す。また、S 3 5 3 2 の今回歩容瞬時値（単純化モデル歩容瞬時値）の算出（決定）処理においては、前記第 3 実施形態で説明したように目標 Z M P まわりのモデル操作
- 15      床反力モーメント水平成分を 0 として歩容の瞬時値を生成した上で、さらに第 3 実施形態において述べた上体姿勢傾斜角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  に相当する単純化歩容上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$ （前回値）を発生する上体傾斜モードの摂動運動と第 3 実施形態において述べた上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  に相当する単純
- 20      化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$ （前回値）を発生する上体並進モードの摂動運動と第 3 実施形態において述べた逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  に相当する単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_a$ （前回値）を発生する逆位相腕振りモードの摂動運動を付加する。これにより、単純化モデル 2 0 0 が出力する歩容の瞬
- 25      時値を補正する。

より具体的に説明すると、本実施形態における図 6 5 の S 3 5 3 2 の

## 2 3 2

- 処理においては、そのサブルーチン処理である図 5 7 の S 3 4 1 4 と S 3 4 1 6 において、単純化モデル 2 0 0 で求めた上体水平加速度に、前記式 0 3 y の右辺第 2 項を  $M_p$  (前回値) に等しいとした式、すなわち  $M_p = m_b * (Z_b - Z_{zmp}) * (d^2 X_b / dt^2)$  という式に基づいて求められる上
- 5 体水平加速度 ( $d^2 X_b / dt^2$ ) を摂動分として加えてなる上体水平加速度を今回歩容の初期から現在時刻  $t$  まで 2 階積分することにより、現在時刻  $t$  における上体水平位置の瞬時値が求められる。また、図 5 7 の S 3 4 1 4 において、単純化モデル 2 0 0 で求めた上体姿勢傾斜角加速度に、前記式 0 3 y の右辺第 7 項を  $M_r$  (前回値) に等しいとした式、すなわち、
- 10  $M_r = J * d^2 \theta_{by} / dt^2$  という式に基づいて求められる上体姿勢傾斜角加速度 ( $d^2 \theta_{by} / dt^2$ ) を摂動分として加えてなる上体姿勢傾斜角加速度を今回歩容の初期から現在時刻  $t$  まで 2 階積分することにより、現在時刻  $t$  における上体姿勢傾斜角の瞬時値が求められる。また、図 5 7 の S 3 4 1 4 において、単純化モデル 2 0 0 で求めた逆位相腕振り角加速度
- 15 に、前記式 0 3 z の右辺第 8 項を  $M_a$  (前回値) に等しいとした式、すなわち、 $M_a = J_{az} * d^2 \theta_{az} / dt^2$  という式に基づいて求められる逆位相腕振り角加速度 ( $d^2 \theta_{az} / dt^2$ ) を摂動分として加えてなる逆位相腕振り角加速度を今回歩容の初期から現在時刻  $t$  まで 2 階積分することにより、現在時刻  $t$  における逆位相腕振り角の瞬時値が求められる。
- 20 補足すると、上体水平位置と上体姿勢傾斜角については、サジタルプレーン上の瞬時値について述べたが、ラテラルプレーン上の瞬時値も同様に求める。

図 7 4 において、単純化モデル 2 0 0 から先の部分が S 3 5 3 6 の処理に相当する処理を実行する部分である。以下に図 7 4 を用いて S 3 5

25 3 6 の処理を詳細に説明する。

S 3 5 3 6 では、まず、S 3 0 3 2 において上記の如く単純化モデル

## 2 3 3

上体水平位置補正用モーメント  $M_p$ （詳しくは時刻  $(t - \Delta t)$  の制御周期での前回値）を基に補正された単純化モデル水平上体位置が目標上体水平位置（時刻  $t$  での上体水平位置の最終的な目標瞬時値）として出力される。また、単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$ （詳しくは時刻  $(t - \Delta t)$  の制御周期での前回値）を基に補正された単純化モデル上体姿勢傾斜角が目標上体姿勢傾斜角（時刻  $t$  での上体姿勢傾斜角の最終的な目標瞬時値）として出力される。また、単純化モデル逆位相腕振り角補正用振動モデルモーメント  $M_a$ （詳しくは時刻  $(t - \Delta t)$  の制御周期での前回値）を基に補正された単純化モデル逆位相腕振り角が目標逆位相腕振り角（時刻  $t$  での逆位相腕振り角の最終的な目標瞬時値）として出力される。

すなわち、式 h1 0 0、式 h1 0 1、式 h1 0 2 により、最終的な目標上体水平位置と目標上体姿勢傾斜角とが決定される。

- 15 目標上体水平位置＝単純化モデル上体水平位置 …式 h1 0 0  
 目標上体姿勢傾斜角＝単純化モデル上体姿勢傾斜角 …式 h1 0 1  
 目標逆位相腕振り角＝単純化モデル逆位相腕振り角 …式 h1 0 2

次いで、目標上体水平位置（すなわち単純化モデル上体水平位置）、  
 20 目標上体姿勢傾斜角（すなわち単純化モデル上体姿勢傾斜角）、目標逆位相腕振り角（すなわち単純化モデル逆位相腕振り角）および前述のごとく得られた単純化モデル歩容の目標全体重心位置、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの運動変数の瞬時値と目標 Z M P の瞬時値とを、前記逆動力学フルモデル（逆フルモデル）2 0 1 に入力し、入力された運動変  
 25 数で表される運動に釣り合う（すなわち運動によって逆フルモデル 2 0 1 が発生する）床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメント

## 2 3 4

(水平成分および鉛直成分) とが算出される。以降、第 4 実施形態と同様、これらの算出された床反力水平成分、床反力モーメント水平成分および床反力モーメント鉛直成分をそれぞれフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$ 、フルモデル床反力モーメント水平成分  $M_{fullxy}$ 、床反力モーメント鉛直成分  $M_{fullz}$  と呼ぶ。

第 4 実施形態と同様、フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  は、目標床反力水平成分 (時刻  $t$  での床反力水平成分の最終的な目標瞬時値) として出力される。

本実施形態では、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデルと上体水平位置補正用摂動モデルと逆位相腕振り角補正用摂動モデルとを備えないので、上体水平位置補正用摂動モデル制御則と上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル制御則と逆位相腕振り角補正用摂動モデル制御則とに相当する処理は、後述するように、第 4 実施形態とは異なる。

このことを除けば、上記処理以降、単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$  と単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  と単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_a$  とを決定するまでは、第 4 実施形態において、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  と上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  と逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  とを決定する処理と同一の処理が実行される。すなわち、Min 演算部 209、Fin 演算部 210、制限処理部 211 (制限手段)、Mpf 演算部 215、Merr 演算部 216、Mrf 演算部 217 (=  $M_r$  演算部)、Mp 演算部 214 の処理は、第 4 実施形態と同一である。さらに、逆位相腕振り角補正用摂動モデル制御則とに相当する処理を除けば、単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント決定部 230 の処理は、前記第 4 実施形態における逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 230 の処理と同一である。なお、本実施

## 235

形態では、 $M_r$ 、 $M_p$  および  $M_a$  は、それぞれ第 4 実施形態における上体姿勢傾斜角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  と上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  と逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  とにそれぞれ対応するものであるが、第 4 実施形態のように摂動モデルに入力するものではなく、単純化モデル 200 に入力するものである。このため、 $M_r$ 、 $M_p$  および  $M_a$  の名称を本実施形態では、単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント、単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメントと称している。

10 上記のごとく求められた単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$  と単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  と単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_a$  とは、前述のごとく次回制御周期（時刻  $t + \Delta t$ ）に、単純化モデル歩容瞬時値の決定（生成）時に前回値として用いられる。

15 残余の構成及び処理は、第 4 実施形態と同一である。

以下に、上体姿勢傾斜角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  と上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  と逆位相腕振り角安定化モーメント要求値  $M_{afdmd}$  との決定処理について図 7 3 を参照して説明する。

20 図 7 3 に示すように、本実施形態では、前述したように擬似順フルモデル 222 に備える単純化モデル 200 とは別の単純化モデル 223 を備えている。この単純化モデル 223 は、本実施形態でのその機能は、前述した単純化モデル 200 と同一であり、単に動力学モデルだけでなく、前述の図 6 5 の S 3 5 1 0 から S 3 5 3 2 の処理、すなわち単純化  
25 モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表すものである。なお、単純化モデル 223 は、実際上は、上体姿勢傾斜角の瞬時値と、上体水平位置

## 2 3 6

の瞬時値とを決定できればよく、必ずしも図 6 5 の S 3 5 1 0 から S 3 5 3 2 の処理の全てを行なう必要はない。

以下に図 7 3 を用いて本実施形態における Mpfdmd および Mrfdmd の決定処理を詳細に説明する。

- 5      本実施形態においては、単純化モデル 2 2 3 を用いて生成される歩容と前記擬似順動力学フルモデル 2 2 2 を用いて前述の通り算出される歩容との間の上体水平位置、上体姿勢傾斜角および逆位相腕振り角のそれぞれの差が演算部 2 2 4, 2 2 5, 2 2 8 により求められる。そして、これらの差に応じて、これらの差が 0 に収束するように P I D などのフ
- 10    フィードバック制御則によって上体水平位置安定化モーメント要求値 Mpfdmd、上体姿勢傾斜角安定化モーメント要求値 Mrfdmd および逆位相腕振り角安定化モーメント要求値 Mafdm d が決定される。すなわち、単純化モデル 2 2 3 による上体水平位置と擬似順フルモデル 2 2 2 による上体水平位置との差に応じて、フィードバック制御則からなる上体水
- 15    平位置安定化制御則 2 2 6 によって、Mpfdmd が求められる。また、単純化モデル 2 2 3 による上体姿勢傾斜角と擬似順フルモデル 2 2 2 による上体姿勢傾斜角との差に応じて、フィードバック制御則からなる上体姿勢傾斜角安定化制御則 2 2 7 によって、Mrfdmd が求められる。また、単純化モデル 2 2 3 による逆位相腕振り角と擬似順フルモデル 2 2
- 20    2 による逆位相腕振り角との差に応じて、フィードバック制御則からなる逆位相腕振り角安定化制御則によって、Mafdm d が求められる。そして、この決定された Mpfdmd、Mrfdmd 及び Mafdm d が、前記擬似順動力学フルモデルにフィードバックされて入力される。

- 25    なお、本実施形態では、歩容生成装置 1 0 0 は、前記擬似順動力学フルモデル 2 2 2 への入力の一部である目標 Z M P、目標床反力鉛直成分、目標足平位置姿勢および目標腕姿勢などと、前記擬似順動力学フルモデ



## 2 3 7

ル 2 2 2 からの出力である目標上体鉛直位置、目標上体水平位置、目標上体姿勢傾斜角、目標逆位相腕振り角、目標床反力水平成分およびコンプライアンス制御用目標床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）を最終的な今回歩容の目標瞬時値として出力する。

- 5      以上説明した第 5 実施形態によれば、前記第 4 実施形態と同様の作用効果を奏することができる。

なお、前記第 5 実施形態では、上体姿勢傾斜角安定モーメント要求値 Mrfdmd、上体水平位置安定化モーメント要求値 Mpfdmd および逆位相腕振り角安定化モーメント要求値 Mafdmd を擬似順フルモデル 2 2 2  
10      のみに入力するようにしたが、Mrfdmd、Mpfdmd および Mafdmd を単純化モデル 2 2 3 に入力するようにしてもよく、あるいは、単純化モデル 2 2 3 と擬似順フルモデル 2 2 2 とに分配・供給するようにしてもよい。また、補償全床反力モーメント鉛直成分 Mdmdz を単純化モデル 2  
15      2 3 に入力し、この Mdmdz が付加的に発生するように単純化モデル逆位相腕振り角を決定するようにしてもよい。

以上説明した第 5 実施形態は、本発明のうちの第 4 4 ～～第 4 7 発明の実施形態となっている。この場合、第 5 実施形態における床反力モーメント鉛直成分（Mdmdz を付加した床反力モーメント鉛直成分）が制御対象量、上体ヨー角偏差および／または上体ヨー角速度偏差がロボッ  
20      ト 1 の状態量の偏差、Mdmdz が補償床反力モーメントに相当する。また、第 5 実施形態における歩容生成用（フルモデル補正用）の床反力モーメント鉛直成分許容範囲[Mzmin,Mzmax]が制限対象量の許容範囲に相当する。また、単純化モデル歩容の運動成分が目標運動の仮瞬時値に対応し、これを S 3 5 3 6 で修正したものが目標運動の瞬時値に対応す  
25      る。さらに、S 3 5 2 8 で決定される今回歩容パラメータにより定まる床反力が目標床反力の仮瞬時値に相当する。また、第 4 4 発明における

## 238

第1動力学モデルおよび第2動力学モデルにはそれぞれ図73の単純化モデル223、擬似順フルモデルが相当する。なお、第47発明における第1動力学モデル、第2動力学モデル、第3動力学モデルには、それぞれ図12の単純化モデル、図74の逆フルモデル、図73の単純化モデル223が相当する。また、第5実施形態における逆位相腕振り角安定化モーメント  $M_{afdm}$  が第44発明における床反力モーメントの操作量と、第47発明における床反力モーメント補正量の要求値に相当し、これは擬似順フルモデル（詳しくは図74の単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント決定部230）に追加的に入力される。

10

次に、本発明の第6実施形態を図75を参照して説明する。図75は、この発明の第6実施形態に係る装置の動作、具体的には、図65のフローチャートのS3536の歩容の修正手法を説明する機能ブロック図である。なお、図75では、第3実施形態もしくは第4実施形態と同一機能部分については、図66又は図71と同一の参照符号を用いる。

第6実施形態においては、上体水平位置補正用摂動モデル202と上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル203と逆位相腕振り角補正用摂動モデル231とを備える。また、3つの分配器220、221、241を備える。

分配器220、221、241を定義すると、いずれも、1入力2出力の伝達ブロックであり、入力に応じて、一方の出力を決定し（例えば、入力に周波数特性、不感帯特性、飽和特性などの信号処理を行って一方の出力を決定し）、2つの出力の和が入力に一致またはほぼ一致するように、他方の出力を決定する伝達ブロックである。

分配器220には、制限補正目標床反力モーメント水平成分  $M_{ltdxy}$

## 239

から、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  とを減じたもの ( $M_r$  演算部 2.1.4 の出力) である上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$  が入力され、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 2.0.3 に入力する上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  と、単純化モデル 2.0.0 に入力する単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_{rs}$  とに分配される。この時、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  と単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_{rs}$  との和が上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$  に一致するように、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  と単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_{rs}$  とが決定される (出力される)。

より具体的には、上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$  に応じて、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  が決定される。例えば、上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$  を不感帯特性、飽和特性、あるいは周波数特性を持つ信号処理を通して、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  が決定される。また、上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$  から上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  を差し引いたものが、単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_{rs}$  として決定される。さらに具体的に説明すると、本実施形態では、分配器 2.2.0 は、例えば、

入力 (上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r = M_{ltd} - M_{pf} - M_{dmdxy}$ ) をローパスフィルタに通してなる低周波成分 (直流分) を単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_{rs}$  として出力すると共に、その入力 (上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_r$ ) から  $M_{rs}$  を差し引いた成分が上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  として出力される。この

場合、低周波成分 (直流分) である単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント  $M_{rs}$  に関しては、不感帯特性を持たせておき、上記ローパ

## 240

スフィルタの出力が、ある所定値を中心とする所定範囲内に存在する状態では、Mrs が該所定値（例えば 0）に維持されるようにしておく。

分配器 220 の出力である上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル入力 Mri は、前記上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル 203 に入力され、上体姿勢  
5 傾斜角補正用摂動モデル 203 により補正用摂動モデル上体姿勢傾斜角  $\theta_c$  が決定される。

分配器 220 のもうひとつの出力である単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント Mrs は単純化モデル 200 に入力される。これは、  
前記第 5 実施形態における図 74 において、単純化モデル上体姿勢傾斜  
10 角補正用モーメント Mr を単純化モデル 200 に入力することに相当するものである。

分配器 221 においては、フルモデル床反力モーメント水平成分誤差 Merr にゲイン Km を乗じた値を積分器 217a によって積分し、さらに符号を反転した値を入力とする。

15 分配器 221 の入力、分配器 220 と同様、単純化モデル 200 に入力する単純化モデル上体水平位置補正用モーメント Mps と、上体水平位置補正用摂動モデル 202 に入力する誤差補正モーメント Me とに分配される。より具体的には、積分器 217a の出力に応じて、誤差補正モーメント Me が決定される。例えば、積分器 217a の出力（分配  
20 器 220 の入力）を不感帯特性、飽和特性、あるいは周波数特性を持つ信号処理を通して、誤差補正モーメント Me が決定される。また、積分器 217a の出力から、誤差補正モーメント Me を差し引いたものが、単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント Mrs として決定される。  
さらに具体的に説明すると、本実施形態では、分配器 221 は、例えば、  
25 入力（積分器 217a の出力）をローパスフィルタに通してなる低周波成分（直流分）を単純化モデル上体水平位置補正用モーメント Mps と

## 2 4 1

して出力すると共に、その入力（積分器 2 1 7 a の出力）から  $M_{ps}$  を差し引いた成分を誤差補正モーメント  $M_e$  として出力する。この場合、低周波成分（直流分）である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  に関しては、不感帯特性を持たせておき、上記ローパスフィルタの出力が、ある所定値を中心とする所定範囲内に存在する状態では、 $M_{ps}$  が該所定値（例えば 0）に維持されるようにしておく。

分配器 2 2 1 の出力である誤差補正モーメント  $M_e$  に上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を  $M_p$  演算部 2 1 7 b で加算することにより上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  が求められる。

そして、上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  は、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 に入力され、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 により補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  が決定される。

分配器 2 2 1 のもうひとつの出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  は単純化モデル 2 0 0 に入力される。これは、前記第 5 実施形態の図 7 4 において、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  を単純化モデル 2 0 0 に入力することに相当するものである。

逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 2 3 0 は、第 4 実施形態において用いた図 7 2 に示す逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部と同一である。ただし、図 7 2 の出力である逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  は、逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 に直接入力されず、分配器 2 4 1 に入力される。そこで、本実施形態では逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント  $M_a$  は、名称を改めて逆位相腕振り角補正用モデルモーメント  $M_a$  と呼ぶ。

分配器 2 4 1 においては、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 2 3 0 が決定した逆位相腕振り角補正用モデルモーメント  $M_a$

## 2 4 2

を入力とする。

分配器 2 4 1 の入力は、分配器 2 2 0 と同様、単純化モデル 2 0 0 に  
入力する単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_{as}$  と、逆位  
相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 に入力する逆位相腕振り角補正用摂  
5 動モデル入力  $M_{ai}$  とに分配される。

この時、逆位相腕振り角補正用摂動モデル入力  $M_{ai}$  と単純化モデル  
逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_{as}$  との和が逆位相腕振り角補正用  
モデルモーメント  $M_a$  に一致するように、逆位相腕振り角補正用摂動モ  
デル入力  $M_{ai}$  と単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_{as}$  と  
10 が決定される（出力される）。

より具体的には、逆位相腕振り角補正用モデルモーメント  $M_a$  に応じ  
て、逆位相腕振り角補正用摂動モデル入力  $M_{ai}$  が決定される。例えば、  
逆位相腕振り角補正用モデルモーメント  $M_a$  を不感帯特性、飽和特性、  
あるいは周波数特性を持つ信号処理を通して、逆位相腕振り角補正用摂  
15 動モデル入力  $M_{ai}$  が決定される。また、逆位相腕振り角補正用モデル  
モーメント  $M_a$  から逆位相腕振り角補正用摂動モデル入力  $M_{ai}$  を差し  
引いたものが、単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_{as}$  と  
して決定される。さらに具体的に説明すると、本実施形態では、分配器  
2 4 1 は、例えば、入力（逆位相腕振り角補正用モデルモーメント  
20  $M_a$ ）をローパスフィルタに通してなる低周波成分（直流分）を単純化  
モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_{as}$  として出力すると共に、  
その入力（逆位相腕振り角補正用モデルモーメント  $M_a$ ）から  $M_{as}$  を  
差し引いた成分が逆位相腕振り角補正用摂動モデル入力  $M_{ai}$  として出  
力される。この場合、低周波成分（直流分）である単純化モデル逆位相  
25 腕振り角補正用モーメント  $M_{as}$  に関しては、不感帯特性を持たせてお  
き、上記ローパスフィルタの出力が、ある所定値を中心とする所定範囲

## 2 4 3

内に存在する状態では、Mas が該所定値（例えば 0）に維持されるようにしておく。

分配器 2 4 1 の出力である逆位相腕振り角補正用摂動モデル入力 Mai は、前記逆位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 に入力され、逆  
5 位相腕振り角補正用摂動モデル 2 3 1 により補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  が決定される。

分配器 2 4 1 のもうひとつの出力である単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント Mas は単純化モデル 2 0 0 に入力される。これは、前記第 5 実施形態における図 7 4 において、単純化モデル逆位相腕振り  
10 角補正用モーメント Ma を単純化モデル 2 0 0 に入力することに相当するものである。

単純化モデル 2 0 0 は、前記第 5 実施形態と同様、単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理において、目標 ZMP まわりに床反力モーメント水平成分が発生しないように（モデル操作床反力モーメントを 0 と  
15 して）歩容の瞬時値を生成した上で、単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント Mrs（前回値）を発生する上体傾斜モードの摂動運動を付加し、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント Mps（前回値）を発生する上体並進モードの摂動運動を付加し、さらに単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント Mas を発生する逆位相腕振りモードの  
20 摂動運動を付加して、歩容の瞬時値を補正する。

なお、本実施形態では、図 6 5 の S 3 5 2 8 の処理の一部である図 4 3 の S 8 0 0 において、前回歩容の終端状態として、前回歩容終端における単純化モデルの状態量を用いる。従って、分配器 2 2 0, 2 2 1, 2 4 1 から単純化モデルに出力される Mrs、Mps 及び Mas が 0 以外の  
25 値となる時があれば、単純化モデルは当初の挙動からずれるので、これに応じて S 3 5 2 8 において、歩容パラメータが適宜修正される。また、

## 2 4 4

前記不感帯の領域を大きく設定すると、Mrs、Mps 及び Mas の絶対値が小さくなるので、歩容パラメータの修正量の絶対値も小さくなる。

その他の構成及び処理は、第 4 実施形態と同一である。より詳しくは、演算部 2 0 4、2 0 5、目標上体水平位置を演算する演算部、Merr 演算部 2 1 6、上体姿勢傾斜角補正用摂動モデル制御則 2 0 7、上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6、Min 演算部 2 0 9、Fin 演算部 2 1 0、制限処理部 2 1 1、Mpf 演算部 2 1 5、逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメント決定部 2 4 0 の処理は、前記第 4 実施形態と同一である。

10     なお、本実施形態では、前記第 3 実施形態で説明したように今回歩容の終端等で各摂動モデル 2 0 2、2 0 3、2 3 1 の状態量により単純化モデル 2 0 0 の状態量を修正するような処理は行なう必要はない。これは、分配器 2 2 0、2 2 1、2 4 1 から単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント Mrs、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  
15     Mps 及び単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント Mas が追加入力されるからである。

かかる本実施形態では、前記第 4 実施形態あるいは第 5 実施形態と同様の作用効果を奏することができる。

20     なお、本実施形態では、各分配器 2 2 0、2 2 1、2 4 1 の 2 つの出力のうち一方を 0 とし、他方を入力に一致させるようにしても良い。

この場合、例えば分配器 2 2 0 の出力である単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメント Mrs を 0 にし、分配器 2 2 1 の出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント Mps を 0 にし、分配器 2 4 1 の出力である単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント Mas を 0  
25     にすると、第 4 実施形態と同一の作用効果を奏することとなる（事実上、第 4 実施形態のものと同一構成となる）。



## 245

また、誤差補正モーメント  $M_e$  に上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を加算した値を図示しない第3の分配器に入力し、その出力の一方を上体水平位置補正用摂動モデルに入力し、もう一方の出力を単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  に加算しても良い。

- 5 この場合、分配器221の出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  を0にしても良い。すなわち、分配器221を省略し、フルモデル床反力モーメント誤差  $M_{err}$  にゲイン  $K_m$  を乗じた値を積分して符号を反転した値を上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  に加算した値を第3の分配器に入力しても良い。
- 10 以上説明した第6実施形態は、本発明のうちの第1～第10発明、第12～第15発明、第20～第22発明、第24～第32発明、第34～第41発明および第43発明の実施形態になっている。この場合、第6実施形態における床反力モーメント鉛直成分 ( $M_{dmdz}$  を付加した床反力モーメント鉛直成分) が制御対象量、上体ヨー角偏差および／または上体ヨー角速度偏差がロボット1の状態量の偏差、 $M_{dmdz}$  が補償床反力モーメントに相当する。また、第6実施形態における歩容生成用 (フルモデル補正用) の床反力モーメント鉛直成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  が制限対象量の許容範囲に相当する。また、単純化モデル歩容の運動成分が目標運動の仮瞬時値に相当し、これをS3536
- 20 で修正したものが目標運動の瞬時値に相当する。さらに、S3528で決定される今回歩容パラメータにより定まる床反力が目標床反力の仮瞬時値に相当する。また、第1発明、第6発明、第10発明、および第20発明における動力学モデルは、逆フルモデル (逆位相腕振り角補正用摂動モデルを含む) が相当し、第31発明における第1動力学モデル、
- 25 第2動力学モデルはそれぞれ図12の単純化モデルと逆フルモデルが相当する。そして、前記逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_a$  が第3発明

## 246

におけるモデル補正床反力モーメントと、第10発明におけるモーメント修正操作量と、および第36発明における床反力モーメントの操作量に相当し、該  $M_a$  のうちの単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_{as}$  が第31発明における床反力モーメント補正量に、 $M_{ai}$  が第36発明における摂動モデル操作量に相当する。また、第6実施形態における逆位相腕振り角補正用モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  が第3発明におけるモデル補正床反力モーメントと、第24発明における摂動モデル操作量の要求値と、第34発明における床反力モーメント補正量の要求値と、第37発明における床反力モーメントの操作量の要求値とに相当し、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  が第2発明における目標運動の仮瞬時値の修正量と、第22発明における目標運動の補正量と、第35発明における目標運動の補正量とに相当する。さらに、第6実施形態における、無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{inz}$  が第43発明における制限対象量の推定値に相当する。さらに、第6実施形態におけるフルモデル床反力モーメント鉛直成分  $M_{fullz}$  が、目標運動の仮瞬時値にフルモデル（動力学モデル）上で釣り合う床反力モーメントの鉛直成分に相当する。そして、これに図72の演算部230gで  $M_{dmz}$  を加えたものが第20発明および第31発明におけるモデル制限対象量瞬時値に相当する。また、第6実施形態では、第27発明の如く、目標運動の補正量（補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$ ）が動力学モデルである逆フルモデルに追加的に入力される。さらに、第6実施形態では、第31発明の如く単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_{as}$  が第1の動力学モデルとしての単純化モデルに追加的に入力される。

25      なお、前記第6実施形態においては、 $M_{afdm}$  は定常的に0となるものではないが、これを定常的に0とすれば、本発明のうちの第23発明、

第33発明、第42発明の実施形態が構成されることとなる。

なお、以上説明した第3～第6実施形態では、図65のS3532において、目標ZMPを満足するように、すなわち、目標ZMPまわりの  
5 床反力モーメント水平成分が0になるように、今回歩容瞬時値（目標運動の仮瞬時値）を決定するようにしたが、これに代えて、第1実施形態における図56のS3032のように、目標ZMPまわりにモデル操作  
床反力モーメント水平成分が発生するように今回歩容瞬時値を決定する  
ようにしてもよい。この場合には、図53に示す如く、歩容生成装置1  
10 00に補償全床反力モーメント水平成分分配器110からモデル操作床  
反力モーメント水平成分を与えるようにすればよい。

また、以上説明した第1～第6実施形態においては、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  は、上体姿勢角・角速度の代わりに、全体  
重心水平位置・速度など、ロボット1の他の姿勢に関する状態量に基づ  
15 いて決定しても良い。

次に、本発明の第7実施形態を図76から図83を参照して説明する。

本実施形態における制御ユニット60の機能ブロック図を図76に示  
20 す。なお、本実施形態では、前記第2実施形態と同一構成部分もしくは  
同一機能部分については第2実施形態と同一の参照符号を用いる。

本実施形態では、第2実施形態（図59参照）に比較して、実ロボット1の滑りの有無を判定する滑り判定部114が追加されている。また、  
滑り判定部114から出力される滑り判定結果が歩容生成装置100に  
25 入力される。歩容生成装置100においては、滑り判定結果が滑りあり  
と判定されると、歩容パラメータを基に決定される床反力水平成分許容

## 248

範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲を狭める。また、歩容生成装置 100 は、滑り判定結果が滑りなしと判定されると、歩容パラメータを基に決定される床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲に戻す。他の構成および処理に関しては、前記第 2 実施形態と同一である。

滑り判定部 114 を、その処理を表すフローチャートである図 79 を用いて詳細に説明すると、まず、S5210において、スピン判定サブルーチンが実行される。スピン判定サブルーチンでは、そのフローチャートである図 80 の S5310 に進み、実上体姿勢角速度および関節角指令（検出値）を基に支持脚足平 22 の対地角速度鉛直成分  $\omega_{supz}$  を求める。次いで S5312 に進み、足平 22 の 6 軸力センサ 50 の検出値（実床反力）を基に、支持脚に作用している実床反力モーメント鉛直成分の時間的な変化率である支持脚床反力モーメント鉛直成分の変化率  $dM_{supactz}/dt$  を求める。次いで S5314 に進み、前記支持脚足平 22 の対地角速度鉛直成分  $\omega_{supz}$  の絶対値がある所定の値  $\omega_e$  を越えているか否かを判定する。越えている場合には、S5316 に進み、前記支持脚床反力モーメント鉛直成分の変化率  $dM_{supactz}/dt$  を前記支持脚足平の対地角速度鉛直成分  $\omega_{supz}$  で割って符号を反転した値である、支持脚の見かけねじりばね定数  $K_{supt}$  を求める。次いで S5318 に進み、 $K_{supt}$  がある所定の値  $K_{suptmin}$  よりも小さいか否かを判定し、小さい場合には、S5320 に進み、スピン判定結果を、スピンありと判定し、そうでない場合には、S5322 に進み、スピン判定結果を、スピンなしと判定する。また、S5314 において、前記支持脚足平の対地角速度鉛直成分  $\omega_{supz}$  の絶対値が前記所定の値  $\omega_e$  を越えていないと判定された場合には、S5324 に進み、スピン判定結果を、スピンなしと判定する。このようにスピンの有無を判定することで、足平 2

## 249

2などの撓み（弾性変形）によって、 $\omega_{supz}$ の絶対値がある所定の値 $\omega_e$ を超えたようなときに、スピン有りと誤判定されるような事態が回避される。

5 以上のごとくS5210の処理を完了した後、S5212に進み、並進滑り判定サブルーチンが実行される。

並進滑り判定サブルーチンでは、そのフローチャートである図81のS5410に進み、実上体姿勢角速度、加速度検出値および関節角指令（検出値）を基に支持脚足平22の対地並進速度水平成分 $V_{supxy}$ を求める。次いでS5412に進み、足平22の6軸力センサ50の検出値  
10 （実床反力）を基に、支持脚に作用している実床反力水平成分の時間的な変化率である支持脚床反力水平成分の変化率 $dF_{supactxy}/dt$ を求める。次いでS5414に進み、前記支持脚足平の対地並進速度水平成分 $V_{supxy}$ の絶対値がある所定の値 $V_e$ を越えているか否かを判定する。越えている場合には、S5416に進み、前記支持脚床反力水平成分の  
15 変化率 $dF_{supactxy}/dt$ を前記支持脚足平22の対地並進速度水平成分 $V_{supxy}$ で割って符号を反転した値である、支持脚の見かけせん断ばね定数 $K_{sups}(= (-dF_{supactxy}/dt)/V_{supxy})$ を求める。次いでS5418に進み、 $K_{sups}$ がある所定の値 $K_{supsmin}$ よりも小さいか否かを判定し、小さい場合には、S5420に進み、並進滑り判定結果を、並進滑り  
20 ありと判定し、そうでない場合には、S5422に進み、並進滑り判定結果を、並進滑りなしと判定する。また、S5414において、前記支持脚足平の対地並進速度水平成分 $V_{supxy}$ の絶対値が前記所定の値 $V_e$ を越えていないと判定された場合には、S5424に進み、並進滑り判定結果を、並進滑りなしと判定する。このように並進滑りの有無を  
25 判定することで、足平22などの撓み（弾性変形）によって、 $K_{sups}$ の絶対値がある所定の値 $K_{supsmin}$ を超えたようなときに、並進滑り

## 250

有りと誤判定されるような事態が回避される。

以上のごとく S 5 2 1 2 の処理を完了した後、S 5 2 1 4 に進み、滑り振動判定サブルーチンが実行される。

滑り振動判定サブルーチンでは、そのフローチャートである図 8 2 の  
5 S 5 5 1 0 に進み、足平 2 2 の 6 軸力センサ 5 0 の検出値（並進力水平成分および／またはモーメント鉛直成分）をバンドパスフィルタに通すことにより、滑り振動成分を抽出する。尚、足平 2 2 の 6 軸力センサ 5 0 の検出値の代わりに、足平 2 2 にヨーレートセンサ、加速度センサ等を備えて、その検出値を用いても良い。また、バンドパスフィルタの通  
10 過周波数帯は、足平 2 2 の足底や床面の材質などに応じてあらかじめ設定される。次いで S 5 5 1 2 に進み、検出された滑り振動成分の大きさの絶対値がある所定の値  $Ampe$  を越えているか否かを判定する。越えている場合には、S 5 5 1 4 に進み、滑り振動判定結果を、滑り振動ありと判定し、そうでない場合には、S 5 5 1 6 に進み、滑り振動判定結  
15 果を、滑り振動なしと判定する。

以上のごとく S 5 2 1 4 の処理を完了した後、S 5 2 1 6 に進み、スピン判定結果がスピンあり、または並進滑り判定結果が並進滑りあり、または滑り振動判定結果が滑り振動ありであるならば、S 5 2 1 8 に進み、総合判定結果である滑り判定結果を滑りありと決定し、そうでない  
20 ならば、S 5 2 2 0 に進み、総合判定結果である滑り判定結果を滑りなしと決定する。以上が、滑り判定部 1 1 4 の処理である。

図 7 7 に本実施形態における歩容生成装置 1 0 0 のメインルーチン処理のフローチャートを示す。

同図 7 7 おいて、S 2 3 1 0 から S 2 3 3 2 までは、第 2 実施形態の  
25 フローチャート（図 6 0）の S 2 0 1 0 から S 2 0 3 2 までの処理と同一の処理が行なわれる。

## 251

次いでS 2 3 3 4に進み、修正歩容瞬時値決定サブルーチンが実行される。

本実施形態では、修正歩容瞬時値決定サブルーチンでは、元歩容に近づくように目標ZMPおよび逆位相腕振り復元角加速度パターンを修正しつつ、修正された目標ZMPまわりにモデル操作床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）が付加的に発生するように修正歩容瞬時値が決定される。ただし床反力許容範囲を滑り判定結果に応じて変更され、この点が第2実施形態と相違する。

図78に修正歩容瞬時値決定サブルーチンのフローチャートを示す。

10 修正歩容瞬時値決定サブルーチンでは、まずS 5 1 0 0からS 5 1 1 4までの処理が、第2実施形態の修正歩容瞬時値決定サブルーチンである図61のS 2 1 0 0からS 2 1 1 2と同様に実行される。次いで、S 5 1 1 6に進み、前記滑り判定部1 1 4による滑り判定結果が滑りありであるか否かを判定し、前記滑り判定結果が滑りありの場合には、S 5 1 1 8に進み、許容範囲低減率 att を徐々に0に近づける（実質的に連続的に減少させる）。尚、許容範囲低減率 att は0から1までの値をとるものとする。S 5 1 1 6において前記滑り判定結果が滑りなしと判定された場合には、S 5 1 2 0に進み、許容範囲低減率 att を徐々に1に近づける（実質的に連続的に増加させる）。

20 次いでS 5 1 2 2に進み、S 5 1 1 0およびS 5 1 1 2で決定した床反力水平成分と床反力モーメント鉛直成分の許容範囲の上限値および下限値である  $F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ,  $M_{zmin}$  および  $M_{zmax}$  にそれぞれ許容範囲低減率 att を乗じることにより、床反力水平成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分許容範囲を狭める。以降、このS 5 1 2 2で決定される床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲を総称的に最終的床反力許容範囲という。尚、当然のことながら低減率が

25

## 252

1の場合には、最終的床反力許容範囲は、S 5 1 1 0およびS 5 1 1 2で決定した床反力水平成分と床反力モーメント鉛直成分の許容範囲（以下、これらを元の床反力許容範囲ということがある）に一致し、該元の床反力許容範囲から狭まらない。

- 5 図83に、滑り判定結果に応じて、許容範囲低減率 att、最終的床反力許容範囲（具体的には、床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲）が変化する様子の例を示す。

- 滑りが発生した場合には、グリップ状態に早急に回復しないとロボット1が転倒する恐れが生じるので、滑りが発生したと判定されたならば、  
10 最終的床反力許容範囲をすばやく狭めるようにした方が良い。ただし、急激過ぎると、歩容の加速度変化が大きくなり過ぎ、衝撃などが生じるので、急激過ぎない適切な値にすべきである。

- 滑りがなくなると判定されたならば、最終的床反力許容範囲を元の床反力許容範囲にすばやく戻すようにした方が良い。最終的床反力許容  
15 範囲が狭いままであると、修正歩容が元歩容から大きくずれていってしまうからである。ただし、急激過ぎると、歩容の運動の加速度変化が大きくなり過ぎ、衝撃などが生じて再び滑ってしまうので、急激過ぎない適切な値にすべきである。

- 次いでS 5 1 2 4に進み、図61のS 2 1 1 4と同様、床反力モーメント水平成分許容範囲と床反力モーメント鉛直成分許容範囲と床反力水平成分許容範囲との条件を満足するように、モデル操作床反力モーメント水平成分、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント（水平成分および鉛直成分）、上体水平加速度および上体姿勢傾斜角加速度および  
20 逆位相腕振り角加速度を決定する。

- 25 次いでS 5 1 2 6からS 5 1 2 8まで進み、図61のS 2 1 1 6からS 2 1 1 8までと同様の処理が行われる。



## 253

上記のごとく修正歩容瞬時値決定サブルーチンが実行され、次いで図 77 の S 2 3 3 6 に進み、現在時刻  $t$  を  $\Delta t$  だけ増加して、再び S 2 3 1 4 に戻り、歩容生成を続ける。

以上が、本実施形態における歩容生成装置 100 の処理である。

- 5     上記のごとく、第7実施形態においては、床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲を滑り判定結果に応じて変更するようにしたが、床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲のいずれか一方だけを変更するようにしても良い。

- 10    一般的に、足平 22 が床面上で平行に滑っている場合（せん断方向に滑っている場合）には、スピン方向（ヨー方向）のグリップ力も低下する。また逆に、スピン方向（ヨー方向）に滑っている場合には、足平 22 が床面上で平行に滑り易くなる。したがって、いずれかの滑りが検知されたならば、床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲の両方を狭める（0にする）方が滑りから回復する効果は高い。
- 15

以上説明した第7実施形態は、前記第2実施形態と同様に本発明のうちの第1～第9発明および第15発明の実施形態になっていると同時に、第16～第19発明の実施形態になっている。

20

- また、第7実施形態は、歩容生成装置 100 としては、第2実施形態の代わりに第1、第3～第6実施形態のいずれのものを用いても良い。第1実施形態で、第7実施形態と同様に、許容範囲を可変化する場合には、図57の S 3.4 1 2 と S 3 4 1 4 との間で、図78の S 5 1 1 6 ～
- 25    S 5 1 2 2 の処理を行なうようにすればよい。なお、この場合、床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲をも、滑りの発生の判断結果に応じ

## 254

て可變的に設定するようにしてもよい。また、前述のごとく、第3から第6実施形態においては、床反力水平成分許容範囲および床反力モーメント鉛直成分許容範囲は、単純化モデル歩容用のものと歩容補正用（フルモデル補正用）のものとの2種類がある。これら許容範囲のすべてを  
5 変更するようにしても良い。また、そうしなくとも、少なくとも、歩容補正用のいずれかの許容範囲を滑り判定結果に応じて、変更するようにすべきである。この場合、前記制限手段（制限処理部）211、230d、230hの処理を実行する際に、図78のS5116～S5122の処理を行なって、許容範囲を可變的に設定するようにすればよい。補  
10 足すると、第3～第6実施形態で、上記のように許容範囲を滑りの判断結果に応じて設定することで、本発明のうちの第48～第51発明の実施形態が構成されることとなる。

また、第7実施形態において、滑りの判定方法としては、実施の形態において挙げた方式以外にも、以下のようないずれを用いても良い。あ  
15 るいはこれらの結果を総合的に（論理和、積などの論理演算を用いてい）判断しても良い。

- 1) 角速度検出器などを基に床に対する足平22の角速度を求め、この値の絶対値がある所定の値を越えたら、滑りが発生と判定する。
- 2) いずれかの脚体2の床反力モーメントの絶対値がある所定の値を越  
20 えたら、滑りが発生と判定する。
- 3) 全床反力モーメント（両脚体2、2の床反力の合力のモーメント）の絶対値がある所定の値を越えたら、滑りが発生と判定する。
- 4) 両脚支持期において、全床反力モーメントの変化率と上体姿勢角速度偏差との比に（-1）を乗じた値がある所定の値（両脚接地時ねじり  
25 剛性）よりも小さいならば、滑りが発生と判定する。
- 5) 視覚センサや空間フィルタ等を用いた非接触型の対地速度、角速度

検出器、あるいは接触型の対地速度、角速度検出器の検出値（推定値）の絶対値がある所定の値を越えたならば、滑りが発生と判定する。

5 次に、前記第1～第7実施形態に係る変形態様を以下に説明する。

前記第3～第7実施形態においては、補償全床反力モーメント水平成分および補償全床反力モーメント鉛直成分を決定するようにしたが、補償全床反力モーメント水平成分を0に設定しても良い。ただしこの場合には、フルモデルを用いて歩容を修正することによる上体姿勢傾斜復元効果はなくなる。

10 前記第3～第7実施形態においては、単純化モデル200による歩容生成（単純化モデル歩容生成）には、本願出願人が先に提案した特開平5-337849号公報の第1実施例、第2実施例の歩容生成装置を用いても良い。フルモデルによる補正量を小さくすることができるので、  
15 補正された歩容が単純化モデル歩容から大きくずれることを防止できる。

前記第1実施形態においては、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  が床反力モーメント許容範囲水平成分を越えると（第3実施形態以降においては、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  とモデル操作床反力モーメント水平成分との和が床反力モーメント許容範囲を越えると）、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分は、床反力モーメント水平成分許容範囲の上限値あるいは下限値になる。但し、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$ （第3実施形態以降においては、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$  とモデル操作床反力モーメント水平成分との和）が床反力モーメント水平成分許容範囲を越えていても、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$ （第3  
25 実施形態以降においては、補償全床反力モーメント水平成分  $M_{dmdxy}$

とモデル操作床反力モーメント水平成分との和)の増加もしくは減少に応じてコンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分も増加もしくは減少するようにしても良い。コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分が床反力モーメント水平成分許容範囲に接近すると、

5   コンプライアンス制御によって制御される実床反力モーメント水平成分が目標よりも少なめになる傾向があり、このためコンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分が少々許容範囲を越えても、すぐには、足平22の本来の接地感を低下させたり、足平22の底面が浮いてしまうような不具合が発生しない場合が多いからである。

- 10   同様の理由により、床反力モーメント水平成分許容範囲をいわゆる支持多角形で表されるZMP存在可能範囲(厳密な表現では、実床反力作用点の存在許容範囲)をモーメント水平成分に換算して得られる許容範囲を越えて設定しても良い。

- 15   コンプライアンス制御によって発生する床反力モーメント水平成分に過度に期待すると、上記のごとく足平22の本来の接地感を低下させたり、足平22の底面が浮いてしまうような不具合が発生する。よって、床反力モーメント水平成分許容範囲は、姿勢制御がコンプライアンス制御に期待する実床反力モーメント水平成分の許容範囲であると言える。

- 20   床反力モーメント水平成分許容範囲は、歩容パラメータからのみならず、検出された実床反力にも基づいて決定しても良い。また、階段でのエッジ位置検出値など、足平22の接地領域の検出値にも基づいて決定してもよい。

- 25   一方、コンプライアンス制御によって発生する床反力モーメント鉛直成分に過度に期待すると、スピンしてしまうような不具合が発生する。よって、床反力モーメント鉛直成分許容範囲は、姿勢制御がコンプライアンス制御に期待する実床反力モーメント鉛直成分の許容範囲であると

言える。

前記第1実施形態の図56のS3028における今回歩容パラメータの修正（目標ZMPの修正）を制御周期毎に実行するように、メインフローチャートの処理を変更しても良い。

- 5 修正歩容（目標歩容）が元歩容より大きくずれてしまう場合（発散してしまう場合）には、次回歩容の歩容パラメータ修正をする頃に既に、大きくずれて過ぎてしまい（発散し過ぎてしまい）、次回歩容の歩容パラメータ修正だけでは、継続的長期的に安定な目標歩容を生成することが困難になる。今回歩容パラメータの修正（目標ZMPの修正）を制御
- 10 周期毎に実行することによって、この問題をかなり解決することができる。

さらには、元歩容からのずれ具合によって、今回歩容の足平着地位置や着地時刻などを制御周期毎に変更しても良い。

- 具体的には、S3020からS3030までの処理を制御周期毎に実行するように処理フローを変更しておき、S3020において、次回歩容支持脚座標系（次回歩容支持脚座標系は、次の足平着地位置姿勢に対応）、次次回歩容支持脚座標系（次次回歩容支持脚座標系は、次の次の足平着地位置姿勢に対応）、今回歩容周期（今回歩容周期は、次の足平着地時刻に対応）および次回歩容周期（次回歩容周期は、定常歩容の周期に相当）の少なくともいずれかを、S3028における今回歩容パラメータの修正（特に目標ZMPの修正）が小さくなるように（すなわち、今回歩容の安定余裕が高く維持されるように）、適宜変更すれば良い。
- 15
- 20

さらには、上記以外の歩容パラメータを変更しても良い。

- また、修正歩容の元歩容からのずれは、単純化モデル上体姿勢傾斜角
- 25 補正用モーメント  $M_r$ 、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  および単純化モデル逆位相腕振り角補正用モーメント  $M_a$  などから

動力学モデルを用いて推定することができるので、 $M_r$ 、 $M_p$  および  $M_a$  に応じてモデルの挙動ずれを推定し、推定された挙動ずれを基に、歩容パラメータを修正してもよい。あるいは、 $M_r$ 、 $M_p$  および  $M_a$  と歩容パラメータの修正量の適正值との関係をあらかじめ求めてマップ化してお

5 いて、 $M_r$ 、 $M_p$  および  $M_a$  に応じてマップを基に歩容パラメータの修正量を決定してもよい。

また、他の実施形態（第3～第6実施形態）に対しても上記と同様に、処理フローを変更して良い。

復元条件には、前記した条件以外にも、関節角が許容範囲を越えてい

10 ないか、脚などの干渉がないか、関節角速度、トルクが過大でないかなどのキネマティクス条件、ダイナミクス条件を加えても良い。

また、これに伴って、前述したごとく、今回歩容パラメータの修正（目標ZMPあるいは着地位置、時刻などの修正）を制御周期毎に実行するようにメインフローチャートの処理を変更した場合には、今回歩容

15 の安定余裕が高く維持されるように適宜変更される歩容パラメータの値が、適切な値になるように（ある制約条件を満足するように）することも、復元条件のひとつに加えても良い。

歩容の切り変わり目で決定された（読み込まれた）着地位置、着地時刻は、上位の制御装置からの指示（歩行計画決定部やオペレータからの

20 指示など。これを当初の要求と呼ぶ。）によって決定されるので、修正歩容の着地位置、着地時刻は、できる限り歩容の切り変わり目で決定された（読み込まれた）着地位置、着地時刻に戻るべきである。そこで、歩容の切り変わり目で決定された（読み込まれた）着地位置、着地時刻を記憶し、修正歩容の着地位置、着地時刻が、記憶された着地位置、着

25 地時刻にできる限り一致または近づくことも復元条件に加えても良い。

ただし、実は、前記復元条件4、5および6によって、修正歩容の着地

位置、着地時刻は、できる限り歩容の切り変わり目で決定された（読み込まれた）着地位置、着地時刻に徐々に戻る作用が働くので、あえて追加する必要はない。

また、状況の変化に対応して、当初の要求を変更し、変更した要求を  
5 満足する歩容パラメータに、上記のごとく歩容の安定余裕を高く維持するために適宜変更される歩容パラメータが、できる限り一致または近づくことを復元条件に加えても良い。この場合、前記前記復元条件 4、5 および 6 は削除するべきである。

前述した各種の復元条件を満足するモデル上体水平位置安定化床反力  
10 モーメントとモデル上体姿勢傾斜角安定化床反力モーメントの決定法には、制約条件下で最適値を求めるための線形計画法（シンプレックス法など）や探索法を用いれば良い。または、ファジー推論を用いても良い。

また、着地位置を変更する場合には、歩行環境の障害物なども考慮しなければならない状況も考えられる。このような状況にも対処できるよ  
15 うにするためには、環境認識や行動決定などの人工知能の分野に属する処理も加えて、修正歩容を決定すべきである。

モデル逆位相腕振り角安定化床反力モーメントの決定法も同様である。

前記第 3 ～ 第 6 実施形態における制限手段（制限処理部）の前後のブロック図は、例えば本願出願人による P C T / J P 0 2 / 1 3 5 9 3 で  
20 示したように、等価変換あるいは近似変換しても良い。

この場合、上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を  $h$  で割った値をローパスフィルタに通した値を補正目標床反力水平成分（フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$ ）から減じた値が上記 P C T 出願におけるバイアス推定値  $destm$  に相当する。したがって、例えば、前記第 4  
25 ～ 第 6 実施形態におけるゲイン  $K_c$  の積分を、時定数  $1/K_c$  の 1 次遅れをフィードバック要素としたポジティブフィードバック系に置き換えた

りして、図 8 4 のように、近似変換をしても良い。この例では、第 4 ～ 第 6 実施形態における Mpf 演算部 2 1 5 が図示の如く近似変換されている。

逆位相腕振り角補正用摂動モデルモーメントも、同様に等価変換ある  
5 いは近似変換して求めるようにしてもよい。

前記第 3 実施形態においては、前記逆位相腕振り角補正用摂動モデル  
モーメントは、図 7 0 に示す機能ブロック図の代わりに、図 8 5 に示す  
機能ブロック図の処理を行うようにしても良い。これを第 8 実施形態と  
して以下に説明すると、図 7 0 では、逆位相腕振り角補正用モデルが復  
10 元する動作によって発生するモーメント鉛直成分までも含めて、床反力  
モーメント鉛直成分許容範囲を越えるか否かが判定されて、逆位相腕振  
り角補正用モデルの挙動が決定されたが、図 8 5 に示す機能ブロック図  
の処理では、逆位相腕振り角補正用モデルが復元する動作によって発生  
するモーメント鉛直成分は、床反力モーメント許容範囲を越えるか否か  
15 を判定する上で無視される。

図 8 5 に示す機能ブロック図の処理を詳細に説明すると、フルモデル  
床反力モーメント鉛直成分  $M_{fullz}$  と上体水平位置補正に起因する床反  
力モーメント鉛直成分摂動量  $M_{pz}$  と補償全床反力モーメント鉛直成分  
 $M_{dmdz}$  との和を無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $M_{inz}$  と  
20 し、これに図 7 0 と同様に制限を加えることにより、制限時補正目標床  
反力モーメント鉛直成分  $M_{ltdz}$  を求める。制限時補正目標床反力モー  
メント鉛直成分  $M_{ltdz}$  は、コンプライアンス制御用目標床反力モーメ  
ント鉛直成分として出力される。さらに、制限時補正目標床反力モーメ  
ント鉛直成分  $M_{ltdz}$  から無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  
25  $M_{inz}$  を減じた値、すなわち、無制限時補正目標床反力モーメント鉛直  
成分  $M_{inz}$  のうちの床反力モーメント鉛直成分許容範囲を越えた分であ



る  $M_{aa}$  を求める。次いで、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  の前回値を基に、PD制御等を用いた逆位相腕振り角補正用摂動モデル制御則によって逆位相腕振り角補正用モデル安定化モーメント要求値  $M_{afdm}$  を求め、これを  $M_{aa}$  から減じた値（モーメント）を逆位相腕  
5 振り角補正用摂動モデルに入力し、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  を得る。

$M_{aa}$  から補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  までの伝達関数は、ローパスフィルタの伝達関数になる。

すなわち、言い換えると、逆位相腕振り角補正用モデルによる床反力  
10 モーメント鉛直成分のキャンセル（超過防止動作）を行わない場合に発生する床反力モーメント鉛直成分（無制限時床反力モーメント鉛直成分）を、床反力モーメント鉛直成分許容範囲を越えないように制限する制限手段（飽和手段）に通すことにより、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分（制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  
15  $M_{ltdz}$ ）を得ると共に、無制限時床反力モーメント鉛直成分を、床反力モーメント鉛直成分許容範囲を越えた分を求める不感帯手段に通した値をローパスフィルタ（すなわちハイカットフィルタ）に通すことにより、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  を得る。

以上説明した第8実施形態は、本発明のうちの第1発明、第2発明、  
20 第4～第15発明、第20～第23発明、第28～第30発明の実施形態になっている。この場合、第8実施形態における床反力モーメント鉛直成分（ $M_{dmz}$  を付加した床反力モーメント鉛直成分）が制御対象量、上体ヨー角偏差および／または上体ヨー角速度偏差がロボット1の状態量の偏差、 $M_{dmz}$  が補償床反力モーメントに相当する。また、第8実  
25 施形態における歩容生成用（フルモデル補正用）の床反力モーメント鉛直成分許容範囲  $[M_{zmin}, M_{zmax}]$  が制限対象量の許容範囲に相当する。

また、単純化モデル歩容の運動成分が目標運動の仮瞬時値に対応し、これを S 3 5 3 6 で修正したものが目標運動の瞬時値に対応する。また、発明における動力学モデルは、フルモデル（逆位相腕振り角補正用摂動モデルを含む）が相当する。そして、Maa が第 1 0 発明におけるモーメント修正操作量に相当し、補正用摂動モデル逆位相腕振り角  $\theta_{ca}$  が第 2 発明および第 1 1 発明における目標運動の仮瞬時値の修正量と、第 2 2 発明における目標運動の補正量とに相当する。さらに第 8 実施形態における、無制限時補正目標床反力モーメント鉛直成分  $Minz$  が第 2 3 発明における制限対象量の推定値に相当する。さらに、第 8 実施形態におけるフルモデル床反力モーメント鉛直成分  $Mfullz$  に上体水平位置補正に起因する床反力モーメント鉛直成分  $Mpz$  を加えたものが、目標運動の仮瞬時値に逆フルモデル（動力学モデル）上ではほぼ釣り合う床反力モーメントの鉛直成分に相当する。そして、これに  $Mdmdz$  を加えたものが第 2 0 発明におけるモデル制限対象量瞬時値に相当する。

15     なお、前記第 8 実施形態においては、前記第 7 実施形態の如く、床反力水平成分許容範囲および／または床反力モーメント鉛直成分許容範囲を滑り判定の結果に応じて可變的に設定するようにしてもよい。

前記第 1 実施形態においては、本願出願人が提案した特開平 5 - 3 3 7 8 4 9 号公報に記載の構成に加え、床反力の並進力水平成分が床反力水平成分の許容範囲を越えないように、床反力水平成分と目標 ZMP まわりの床反力モーメント水平成分との発生の割合が異なる 2 つの運動モードの挙動、例えば、上体並進運動モードの上体並進加速度と上体傾斜運動モードの上体姿勢傾斜角加速度が決定されるので、実ロボット 1 を、修正目標歩容（最終的に歩容生成装置 1 0 0 が出力する歩容）に収束させることができる。つまり、実ロボット 1 の姿勢を安定化させることができる。

## 263

また、コンプライアンス制御用目標床反力モーメント水平成分とモデル操作床反力モーメント水平成分の差がトータルの復元力になる。

また、モデル操作床反力モーメント水平成分は、ZMP存在可能範囲を無視していかなる値でも取ることが可能であるので、非常に高い姿勢  
5 復元力を発生することができる。

また、床反力の並進力水平成分が、床反力水平成分の許容範囲を越えないので、ロボット1のスリップを防止できる。

また、床反力モーメント鉛直成分（コンプライアンス制御用目標床反力モーメント鉛直成分）については実床反力モーメント鉛直成分が、床反  
10 力モーメント鉛直成分の許容範囲を越えないので、ロボット1のスリップをより一層防止できる。

また、床反力鉛直成分が0の時期、すなわち、両脚体2、2がいずれも接地していない時期では、上体並進運動モードに依存せずに上体回転運動モードに依存した姿勢復元が行われ、床と足平22の間の摩擦力に  
15 依存せずに効果的に姿勢復元が行われる。

また、実床反力モーメントが過大になることを防止するので、足平22の本来の接地性が低下したり、足平22の底面が浮いてしまうような不具合が発生することを防止または抑制することができる。

また、1歩分の修正歩容の終端状態を新たな初期状態とした新たな今回歩容が、定常歩容に漸近するように、今回歩容パラメータが決定または変更されるので、継続的に（長期的に）安定性が保証された歩容を生成し続けることができる。

前記第2実施形態においては、上記のごとく、元歩容と修正歩容が同時に生成され、修正歩容は、実ロボット1の姿勢安定化のために修正され  
25 れると共に、コンプライアンス制御により姿勢復元に必要な床反力モーメント（水平成分及び鉛直成分）を発生してもまだ余裕がある場合には、

この余裕を用いて、可能な範囲で元歩容に収束するようにしている。このため、第1実施形態の効果に加え、当初設定した元歩容に近い、すなわち、当初の要求通りの歩容に近い歩容を生成することができる。したがって、あらかじめ設定された移動経路がある場合には、移動経路から大きくずれることを防止できる。また、修正歩容の上体姿勢角が元歩容（当初決定した歩容）の上体姿勢角に収束することを、修正歩容の上体水平位置が元歩容（当初決定した歩容）の上体水平位置に収束することよりも優先したので、上体姿勢角が大きく変動することを抑制することができる。

10 前記第1～第6実施形態では、床反力水平成分許容範囲を設定するようにしたが、床反力水平成分とロボット全体重心水平加速度は、比例関係にあるので、前記各実施形態における床反力水平成分およびその許容範囲の代わりに、ロボット全体重心水平加速度およびその許容範囲を用いても構わない。また、ロボット全体重心水平軌道に近い挙動をする部位の水平加速度軌道に関するパラメータを明示的に設定しても構わない。

15 例えば、脚体2、2の質量が上体3の質量に比べ十分に小さい場合には、上体水平加速度軌道とロボット1の全体重心水平加速度軌道は、ほぼ同じか比例関係にあるので、床反力水平成分およびその許容範囲の代わりに上体水平加速度およびその許容範囲を用いても良い。

20 さらに、斜面移動時（傾斜した床面でロボット1を移動させるとき）の歩容生成においては、床反力水平成分許容範囲や全体重心加速度水平成分の許容範囲の代わりに、並進床反力の床面平行成分（床面に平行な成分）、すなわち摩擦力の許容範囲、あるいは全体重心加速度の床面平行成分（これは重力成分を除けば摩擦力に比例する）の許容範囲を設定

25 するようにしてもよい。例えば、並進床反力の床面平行成分（摩擦力）の許容範囲を設定する場合に関して説明（この説明は全体重心加速度の

265

床面平行成分の許容範囲を設定する場合でも同様である)すると、該摩擦力は、床面の水平面に対する傾斜角度を $\theta f$ (ロボット1の進行方向に向かって前下がり斜面の場合を正とする)とすると、次式c 7 2の関係が成立する。従って、前記実施形態と同様のアルゴリズムに歩容を生成する場合、この式c 7 2の関係をを用いて、摩擦力許容範囲を床反力水平成分許容範囲に変換することで、該床反力水平成分許容範囲を設定するようにすればよい。なお、この場合、式c 7 2の床反力鉛直成分には、目標床反力鉛直成分を用いればよい。

$$10 \quad \text{摩擦力} = \text{床反力水平成分} * \cos(\theta f) - \text{床反力鉛直成分} * \sin(\theta f) \quad \dots \text{式 c 7 2}$$

また、斜面移動時(傾斜した床面でロボット1を移動させるとき)の歩容生成においては、床反力モーメント鉛直成分許容範囲の代わりに、  
 15 床反力モーメントの床面法線方向成分、すなわち摩擦力モーメントの許容範囲を設定するようにしてもよい。例えば、該摩擦力モーメントは、床面の水平面に対する傾斜角度を $\theta f$ (ロボット1の進行方向に向かって前下がり斜面の場合を正とする)とすると、次式c 7 3の関係が成立する。従って、前記実施形態と同様のアルゴリズムに歩容を生成する場合、この式c 7 3の関係をを用いて、床反力モーメント鉛直成分と一床反力モーメント水平成分から摩擦力モーメントを算出し、この値が摩擦力モーメントの許容範囲を越えないように処理を変更すれば良い。

$$25 \quad \begin{aligned} \text{摩擦力モーメント} = & \text{床反力モーメント鉛直成分} * \cos(\theta f) \\ & + \text{床反力モーメント水平成分} * \sin(\theta f) \end{aligned} \quad \dots \text{式 c 7 3}$$

また、前記参考例に関する変形態様で説明した如く、床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメント水平成分とを適切な値にするために、前記の実施形態では、上体傾斜モードと上体並進モードとの2つの運動モードを用いたが、これら以外の運動モードを用いても良い。この場合、運動モードのひとつが床反力水平成分を発生しない運動モードである必要もない。いかなるモードの組み合わせであっても、床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメントの発生の割合が異なる2つの運動モードを用いさえすれば、上記例のように、任意の床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメントとを発生させることができるからである。

また、上体姿勢以外の運動モードを用いても良い。ただし、なるべく小さい変位で大きな床反力水平成分または目標 Z M P まわりの床反力モーメントが発生できる運動モードを選ぶべきである。

例えば、左右の腕を同一回転方向に振りまわす運動モード、接地していない（空中に存在する）足平の位置を振動させる運動モードでも良い。ただし、遊脚軌道を振動させる場合には、着地位置が変わらないように着地直前までには、振動量を実質的に0に戻すべきである。

また、3つ以上の運動モードを用いても良い。

また、選んだモードのうちの少なくとも2つは、床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメントとの発生比率が、互いに異なるものである必要がある。そうでないと、一般的に連立方程式の解がなくなるからである。

さらにできる限り、床反力水平成分をあまり変化させないで目標 Z M P まわりの床反力モーメントを十分に大きく変化させることができる運動モードと、目標 Z M P まわりの床反力モーメントをあまり変化させな

いで床反力水平成分を十分に大きく変化させることができる運動モードとを組み合わせることが望ましい。

言いかえると、全体重心をあまり変化させないで角運動量を十分に大きく変化させることができる運動モードと、角運動量をあまり変化させないで全体重心を十分に大きく変化させることができる運動モードとを組み合わせることが望ましい。運動モードの変位が小さくなるからである。

床反力モーメント鉛直成分を適切な値にするために、前記の実施形態では、逆位相腕振りモードを用いたが、これら以外の運動モードを用いても良い。例えば、前記参考例の変形態様について説明した如く、上体ヨー回転モードを用いたり、上体ヨー回転モードと逆位相腕振りモードとを併用しても良い。

また、床反力モーメント鉛直成分を適切な値にするために用いられる運動モードが床反力水平成分および床反力モーメント水平成分を発生しない運動モードである必要もない。例えば、遊脚を前後に振る運動モードを用いても良い。その運動モードによって発生した床反力水平成分および床反力モーメント水平成分は、上体傾斜モードと上体並進モードとの2つの運動モードを調整することによって、打ち消すことができるからである。

フルモデルを用いる実施形態では、前記単純化モデルとして、前記実施形態に用いた動力学モデル（図12のモデル）以外にも以下のモデルを用いても良い。

1) 図49に示したように複数のリンクに質点を設定した非線形なモデル（多質点モデル）

2) 本願出願人によるPCT公開公報WO/02/40224に示された3質点モデル

## 268

3) 上体にのみ質量がある1質点モデル

4) 全体重心まわりの角運動量変化によって生じる慣性力のモーメントを無視したモデル

5) 重力と慣性力との合力（または床反力）と上体並進運動との関係を表す部分モデルと、上記合力と上体回転運動の関係を表す部分モデルを分離して持つ分離型モデル。例えば、図12に示す質点は、上記合力と上体並進運動との関係を表す部分モデルであり、図12に示すフライホイールは、上記合力と上体回転運動との関係を表す部分モデルである。

ただし、単純化モデルに単純化モデル上体姿勢傾斜角補正用モーメントが加えられる実施形態においては、上記2)、3)、および4)のモデルを用いることはできない。

尚、フルモデルは、基本的には、単純化モデルよりもより近似精度の高い動力学モデルを用いることが好ましいが、単純化モデルと同等の近似精度の動力学モデルを用いてもよい。

15 また、前述した各実施形態において、ブロック線図、フローチャート、およびアルゴリズムなどは、演算処理順序を変えるなどの等価変形をしても良い。また、適宜ローパスフィルタを挿入しても良い。

また、前記各実施形態を2足移動ロボットに関して説明してきたが、1足もしくは3足以上の多脚ロボットにも本発明を適応することができる。

#### 産業上の利用可能性

25 以上のように本発明は、2足移動ロボット等の脚式移動ロボットと床面との摩擦力が小さくなるような状況でも、ロボットのスピンを生じることなく、また、該ロボットの姿勢を安定に保ちつつ、該ロボットを円滑に移動させることができるものとして有用である。



## 請 求 の 範 囲

1. 上体から延設された脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標運動および目標床反力の瞬時値を、少なくとも該ロボットの運動と床反力との関係を表す動力学モデルを用いて逐次決定しつつ、その決定  
5 した目標運動および目標床反力の瞬時値に追従させるように前記ロボットの動作制御を行なう脚式移動ロボットの制御装置において、

前記目標運動および目標床反力に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定す  
10 る許容範囲設定手段と、

少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状態量との偏差と前記許容範囲とに基づいて、前記目標床反力に対応する制限対象量を前記許容範囲に収めつつ、前記目標運動に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記  
15 目標床反力の床反力モーメントとの差が前記偏差を0に近づけるように前記目標運動および目標床反力の瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの制御装置。

2. 前記目標瞬時値決定手段は、前記偏差に応じて該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定  
20 する手段と、少なくとも前記目標運動の所定の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて前記制限対象量が前記許容範囲を超えないように該所定の仮瞬時値の修正量を決定する手段とを備え、その決定した修正量に応じて前記仮瞬時値を修正することにより前記目標運動の瞬時値を決定することを特  
25 徴とする請求の範囲第1項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

3. 前記動力学モデルの状態量を所定の状態量に近づけるための付加的

## 270

な床反力モーメントであるモデル補正床反力モーメントを決定する手段を備え、前記目標運動の所定の仮瞬時値の修正量を決定する手段は、少なくとも前記所定の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントと前記モデル補正床反力モーメン

5 トとに応じて前記制限対象量が前記許容範囲を超えないように前記目標運動の仮瞬時値の修正量を決定することを特徴とする請求の範囲第2項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

4. 前記所定の仮瞬時値の修正量は、前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動の修正量であることを  
10 特徴とする請求の範囲第2項又は第3項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

5. 前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動は、該ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の運動であることを特徴とする請求の範囲第4項に記載の脚式移  
15 動ロボットの制御装置。

6. 上体から延設された脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標運動の瞬時値を、少なくとも該ロボットの運動と床反力との関係を表す動力学モデルを用いて逐次決定しつつ、その決定した目標運動の瞬時値に追従させるように前記ロボットの動作制御を行なう脚式移動ロボ  
20 ットの制御装置において、

前記目標運動に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

25 少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状態量との偏差に応じて該偏差を0に近づ

けるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する補償床反力モーメント決定手段と、

前記目標運動に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて定まる前記制限対象量が前記許容範囲に収まるように目標運動の瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの制御装置。

7. 前記許容範囲に収めた前記制限対象量を目標床反力モーメントとし、その目標床反力モーメントに追従させるようにロボットの動作制御を行なう手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第6項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

8. 前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて定まる前記制限対象量を前記許容範囲に収めるために、前記ロボットの運動のうち、前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動を調整して前記目標運動の瞬時値を決定することを特徴とする請求の範囲第6項又は第7項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

9. 前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動は、該ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の運動であることを特徴とする請求の範囲第8項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

10. 上体から延設された脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標運動の瞬時値を、少なくとも該ロボットの運動と床反力との関係を表す動力学モデルを用いて逐次決定しつつ、その決定した目標運動の瞬時値に追従させるように前記ロボットの動作制御を行なう脚式移動ロボットの制御装置において、

前記目標運動に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

5 前記目標運動の仮瞬時値を逐次決定する仮瞬時値決定手段と、

少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状態量との偏差に応じて該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する補償床反力モーメント決定手段と、

10 前記目標運動の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて定まる前記制限対象量のうちの前記許容範囲を逸脱した分をモーメント修正操作量とし、そのモーメント修正操作量に応じて当該逸脱分が減少傾向になるように前記目標運動の仮瞬時値を修正することにより前記目標運動の瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの制御装置。

1 1. 前記目標瞬時値決定手段は、前記モーメント修正操作量をローパスフィルタに通したものに依りて前記目標運動の仮瞬時値の修正量を求め、その求めた修正量により該仮瞬時値を修正することにより前記目標運動の瞬時値を決定することを特徴とする請求の範囲第10項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

1 2. 前記目標運動の仮瞬時値に前記動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントと前記補償床反力モーメントとに応じて定まる前記制限対象量を前記許容範囲により制限してなる制限済制限対象量に対応する床反力モーメントを目標床反力モーメントとし、その目標床反力モーメントに追従させるようにロボットの動作制御を行なう手段を備えたことを特

## 273

徴とする請求の範囲第10項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

13. 前記目標瞬時値決定手段は、前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動を前記目標運動の仮瞬時値から修正することにより前記目標運動の瞬時値を決定することを特徴

5 とする請求の範囲第10項～第12項のいずれか1項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

14. 前記ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を変化させる運動は、該ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の運動であることを特徴とする請求の範囲第13項に記載の脚

10 式移動ロボットの制御装置。

15. 前記ロボットの姿勢に関する状態量は、該ロボットの上体のヨー角又はヨー角速度を含むことを特徴とする請求の範囲第1項、第6項および第10項のいずれか1項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

16. 前記ロボットの滑りの発生を判断する滑り判断手段を備え、前記  
15 許容範囲設定手段は、該滑り判断手段の判断結果に応じて前記許容範囲を可變的に設定することを特徴とする請求の範囲第1項、第6項および第10項のいずれか1項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

17. 前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体の先端部の対地速度に基づき滑りの発生を判断することを特徴とする請求の範囲第1  
20 6項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

18. 前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体に作用する実床反力の時間的変化率と該脚体の先端部の対地速度とに基づき、該脚体の見かけばね定数を求める手段を備え、少なくとも該見かけばね定数に基づき滑りの発生を判断することを特徴とする請求の範囲第16項に記  
25 載の脚式移動ロボットの制御装置。

19. 前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体に作用する実

## 274

床反力を、所定周波数の近傍範囲に周波数通過特性を有するバンドパスフィルタに通したものに基き滑りの発生を判断することを特徴とする請求の範囲第16項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

20. 上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成し、その目標歩容に追従させるように該ロボットの動作を制御する制御装置において、

少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状状態との偏差に応じて、該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する手段と、

前記目標歩容に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

15 前記目標歩容を構成する目標運動の仮瞬時値を決定する仮瞬時値決定手段と、

前記ロボットの運動と該運動に釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分との関係を表す動力学モデルに、少なくとも前記目標運動の仮瞬時値を入力して、該動力学モデルの出力としての床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分を求め、前記求めた鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから所定の演算によって前記制限対象量の仮瞬時値であるモデル制限対象量瞬時値を決定するモデル演算手段と、

25 少なくとも該モデル制限対象量瞬時値を前記許容範囲に収めるように前記目標運動の仮瞬時値を補正して目標運動の瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの制御装置。

## 275

21. 前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の瞬時値に前記動力学モデル上で略釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから前記所定の演算によって決定される制限対象量瞬時値に対応する床反力モーメント瞬時値を、前記目標歩容を構成する目標床反力の床反力モーメント瞬時値として決定することを特徴とする請求の範囲第20項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

22. 前記目標瞬時値決定手段は、前記ロボットの振動運動と床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分の振動分との関係を表す振動モデルと、

少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記許容範囲とに基づき前記振動モデルの振動分を操作する振動モデル操作量を決定する手段と、

その決定した振動モデル操作量を前記振動モデルに入力することにより前記目標運動の補正量を求める手段と、

該補正量により前記目標運動の仮瞬時値を補正することにより前記目標運動の瞬時値を決定する手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第20項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

23. 前記振動モデル操作量を決定する手段は、前記振動モデル操作量を0と仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値に基づき決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記振動モデル操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第22項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

## 276

24. 少なくとも前記摂動モデルの状態量に応じて前記摂動モデル操作量の要求値を決定する手段を備え、

前記摂動モデル操作量を決定する手段は、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値、前記許容範囲、及び前記要求値に基づき前記摂  
5 動モデルに入力する摂動モデル操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第22項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

25. 前記摂動モデル操作量の要求値を決定する手段は、前記摂動モデルの状態量と該状態量に対する目標値との偏差に応じたフィードバック制御則により前記要求値を逐次決定することを特徴とする請求の範囲第  
10 24項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

26. 前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記摂動モデル操作量を前記要求値に一致させたと仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記要求値とに基づき決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その  
15 比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記摂動モデル操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第24項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

27. 前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の補正量を前記動力学  
20 モデルに追加的に入力する手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第22項に記載の脚移動ロボットの制御装置。

28. 前記摂動モデルは、ロボットの角運動量変化率の鉛直成分又は床面法線方向成分を摂動させる摂動運動と前記制限対象量摂動分との関係を表すモデルであることを特徴とする請求の範囲第22項に記載の脚式  
25 移動ロボットの制御装置。

29. 前記摂動運動は、該ロボットの重心位置を略一定に維持する摂動



## 277

運動であることを特徴とする請求の範囲第28項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

30. 前記振動運動は、ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の振動運動であることを特徴とする請求の範囲第28項又は第529項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

31. 上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成し、その目標歩容に追従させるように該ロボットの動作を制御する制御装置において、

- 10 少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状状態との偏差に応じて、該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する手段と、

- 15 前記目標歩容に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

前記目標歩容を構成する目標運動及び目標床反力のうちの少なくとも目標床反力の仮瞬時値を逐次決定する目標床反力仮瞬時値決定手段と、

- 20 少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値を前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第1動力学モデルに入力し、該第1動力学モデルの出力としての目標運動の仮瞬時値を逐次求める第1モデル演算手段と、

- 25 前記ロボットの運動と該運動に釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分との関係を表す第2動力学モデルに、少なくとも前記目標運動の仮瞬時値を入力して、該第2動力学モデルの出力としての床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分を求め、前記求めた鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから

## 278

所定の演算によって前記制限対象量の仮瞬時値であるモデル制限対象量瞬時値を決定する第2モデル演算手段と、

少なくとも該モデル制限対象量瞬時値を前記許容範囲に収めるように目標床反力の床反力モーメント補正量を求め、その求めた床反力モーメント補正量を前記第1動力学モデルに追加的に入力する第1モデル入力補正手段とを備え、

少なくとも前記第2動力学モデルの入力に基づいて前記目標運動の瞬時値を決定することを特徴とする脚式移動ロボットの制御装置。

32. 前記目標運動の瞬時値に前記第2動力学モデル上で略釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから前記所定の演算によって決定される制限対象量瞬時値に対応する床反力モーメント瞬時値を、前記目標歩容を構成する目標床反力の床反力モーメント瞬時値として決定する手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第31項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

33. 前記第1モデル入力補正手段は、少なくとも前記目標床反力の床反力モーメント補正量を0と仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値に基づいて決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記床反力モーメント補正量を決定することを特徴とする請求の範囲第31項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

34. 前記目標床反力の床反力モーメント補正量の要求値を決定する手段を備え、

前記第1モデル入力補正手段は、少なくとも前記目標床反力の床反力モーメント補正量を前記要求値に一致させたと仮定した場合の前記制限

対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記要求値とに基づいて決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記床反力モーメント補正量を決定することを特徴とする請求の範囲第31項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

35. 少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記許容範囲とに基づき前記目標運動の補正量を求め、その求めた補正量を前記第2  
10 動力学モデルに追加的に入力する第2モデル入力補正手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第31項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

36. 前記ロボットの振動運動と制限対象量振動分との関係を表す振動モデルと、

少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記許容範囲とに基づき床反力モーメントの操作量を決定する手段と、  
15

その決定した床反力モーメントの操作量を、前記第1動力学モデルに入力する前記目標床反力の床反力モーメント補正量と前記振動モデルに入力する振動モデル操作量とに分配する分配手段とを備え、

前記第2モデル入力補正手段は、前記振動モデル操作量を前記振動モデルに入力することにより前記目標運動の補正量を求めることを特徴とする請求の範囲第35項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。  
20

37. 少なくとも前記振動モデルの状態量に応じて前記床反力モーメントの操作量の要求値を決定する手段を備え、

前記床反力モーメントの操作量を決定する手段は、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記許容範囲と前記要求値とに基づき  
25 前記分配手段に与える床反力モーメントの操作量を決定することを特徴

とする請求の範囲第36項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

38. 前記床反力モーメントの操作量の要求値を決定する手段は、前記振動モデルの状態量と該状態量に対する目標値との偏差に応じたフィードバック制御則により前記要求値を逐次決定することを特徴とする請求

5 の範囲第37項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

39. 前記振動モデルは、ロボットの角運動量変化率の鉛直軸回り又は床面法線軸回りの成分を振動させる振動運動と前記制限対象量振動分との関係を表すモデルであることを特徴とする請求の範囲第36項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

10 40. 前記振動運動は、ロボットの重心位置を略一定に維持する振動運動であることを特徴とする請求の範囲第39項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

41. 前記振動運動は、ロボットの上体および／又は該上体から延設された腕体の振動運動であることを特徴とする請求の範囲第39項または

15 第40項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

42. 前記床反力モーメントの操作量を決定する手段は、前記振動モデル操作量を0と仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値に基づいて決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に  
20 制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記床反力モーメントの操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第36項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

43. 前記床反力モーメントの操作量を決定する手段は、前記振動モデル  
25 ル操作量を前記要求値に一致させたと仮定した場合の前記制限対象量の推定値を少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記要求値

とに基づいて決定する手段と、その決定した推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段とを備え、少なくとも前記決定したモデル制限対象量瞬時値と前記制限済制限対象量との差に基づき前記床反力モーメントの操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第37項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

44. 上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成し、その目標歩容に追従させるように該ロボットの動作を制御する制御装置において、

- 10      少なくとも鉛直軸回り又は床面法線軸回りのロボットの姿勢に関する目標状態量と該ロボットの実状態量との偏差に応じて、該偏差を0に近づけるための付加的な床反力モーメントである補償床反力モーメントを決定する手段と、

- 15      前記目標歩容に追従して動作しているロボットに作用させるべき床反力モーメントの鉛直成分又は該床反力モーメントの床面法線方向成分を制限対象量として、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

前記目標歩容を構成する目標運動及び目標床反力のうちの少なくとも目標床反力の仮瞬時値を逐次決定する目標床反力仮瞬時値決定手段と、

- 20      少なくとも該目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第1動力学モデルに入力し、該第1動力学モデルの出力としての目標運動の第1仮瞬時値を求める第1モデル演算手段と、

- 25      目標運動の第2仮瞬時値を決定する手段であって、その決定する第2仮瞬時値にロボットの運動と床反力との関係を表す第2動力学モデル上で釣り合う床反力モーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから所定の演算により求まる制限対象量瞬時値が

前記許容範囲に収まるように、少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値に基づき、該目標運動の第2仮瞬時値を決定する制限付き第2モデル演算手段と、

- 5 少なくとも前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差に基づいて、該差が0に近づくように床反力モーメントの操作量を求める操作量算出手段と、

該床反力モーメントの操作量を前記第1動力学モデル及び第2動力学モデルのうちの少なくともいずれか一方に追加的に入力するモデル入力補正手段とを備え、

- 10 前記目標運動の第2仮瞬時値を該目標運動の目標瞬時値として決定することを特徴とする脚式移動ロボットの制御装置。

45. 前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差は、前記ロボットの所定の部位の姿勢の、鉛直軸回り又は床面法線軸回りの状態量の差を含むことを特徴とする請求の範囲第44項に記載の脚式移動ロボット  
15 の制御装置。

46. 前記目標運動の瞬時値に前記第2動力学モデル上で略釣り合う床反力のモーメントの鉛直成分又は床面法線方向成分と前記補償床反力モーメントとから前記所定の演算によって決定される制限対象量瞬時値に対応する床反力モーメント瞬時値を、前記目標歩容を構成する目標床反  
20 力の床反力モーメント瞬時値として決定する手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第44項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

47. 少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第3動力学モデルに入力し、該第3動力学モデルの出力としての目標運動の第3仮瞬時値を求める第3モデル演算手段を  
25 備え、前記目標床反力の床反力モーメント補正量の要求値を決定する手段は、前記決定した前記目標運動の目標瞬時値と前記目標運動の第3仮

## 283

瞬時値との差に基づいて、該差が0に近づくように前記要求値を決定することを特徴とする請求の範囲第34項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

48. 前記目標歩容に追従して動作している前記ロボットの滑りの発生を判断する滑り判断手段を備え、前記許容範囲設定手段は、該滑り判断手段の判断結果に応じて前記許容範囲を可變的に設定することを特徴とする請求の範囲第20項、第31項、および第44項のいずれか1項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

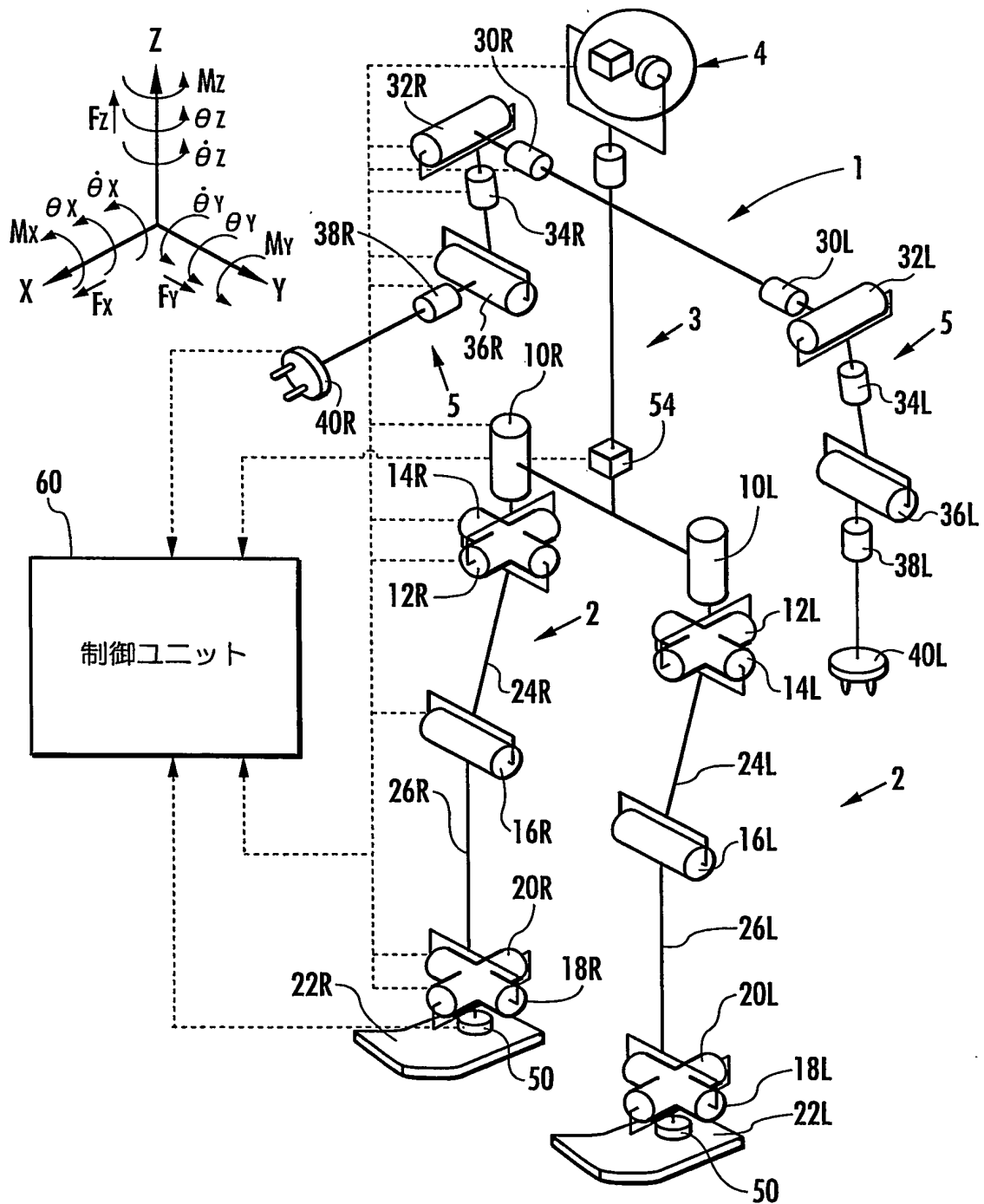
49. 前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体の先端部の対地速度に基づき滑りの発生を判断することを特徴とする請求の範囲第48項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

50. 前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体に作用する実床反力の時間的変化率と該脚体の先端部の対地速度とに基づき、該脚体の見かけばね定数を求める手段を備え、少なくとも該見かけばね定数に基づき滑りの発生を判断することを特徴とする請求の範囲第48項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

51. 前記滑り判断手段は、少なくとも接地している脚体に作用する実床反力を、所定周波数の近傍範囲に周波数通過特性を有するバンドパスフィルタに通したものに基づき滑りの発生を判断することを特徴とする請求の範囲第48項に記載の脚式移動ロボットの制御装置。

1 / 74

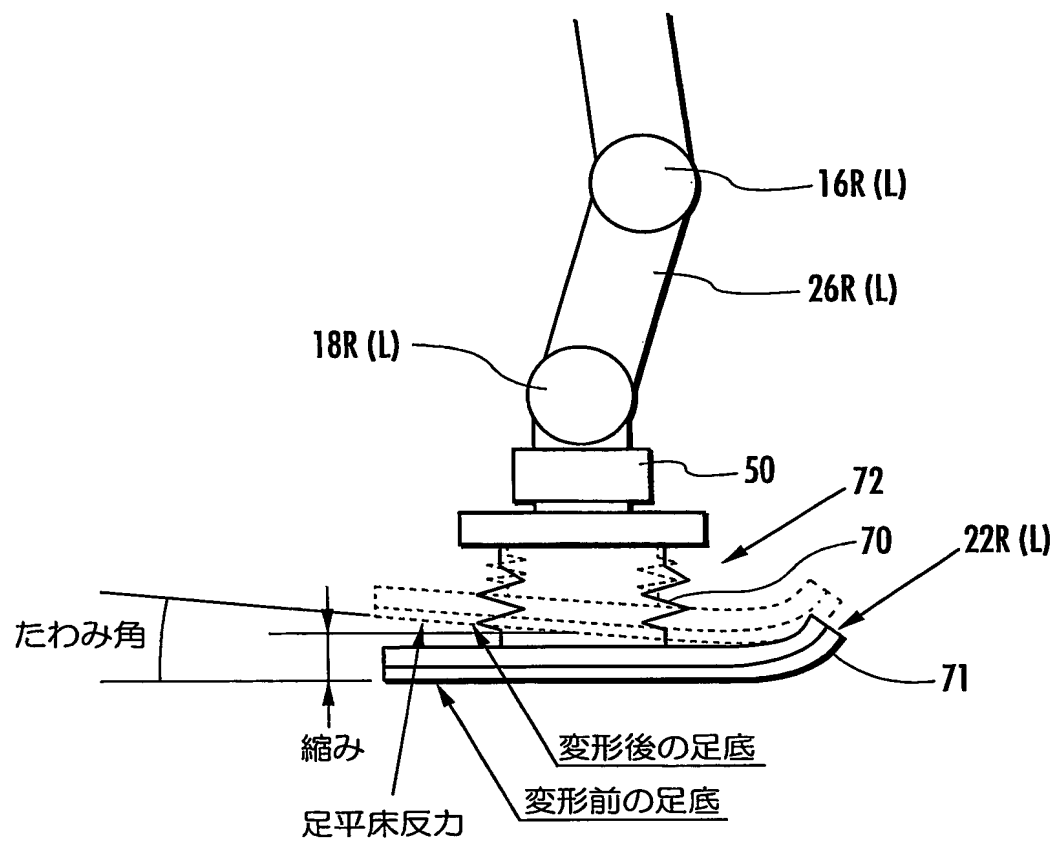
FIG.1





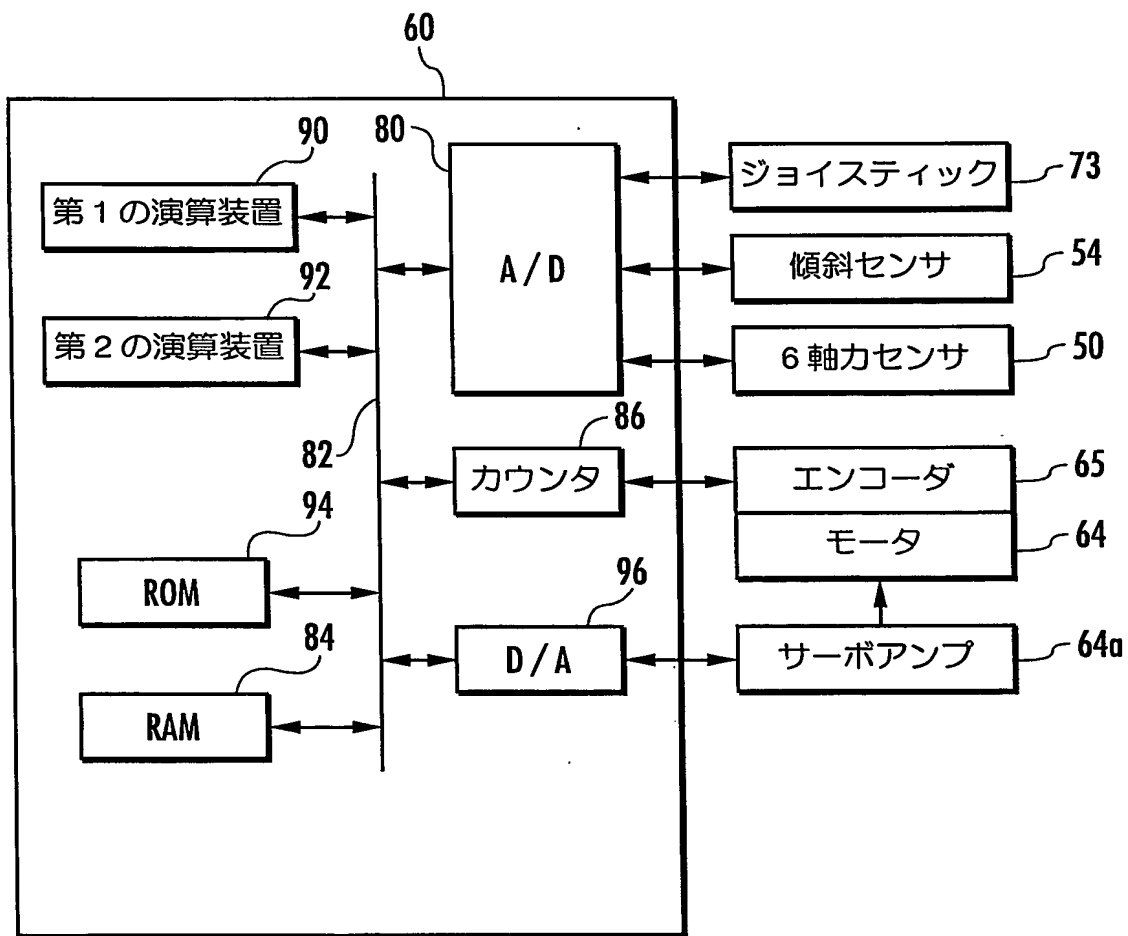
2 / 74

FIG.2



3 / 74

FIG.3



4 / 74

FIG. 4

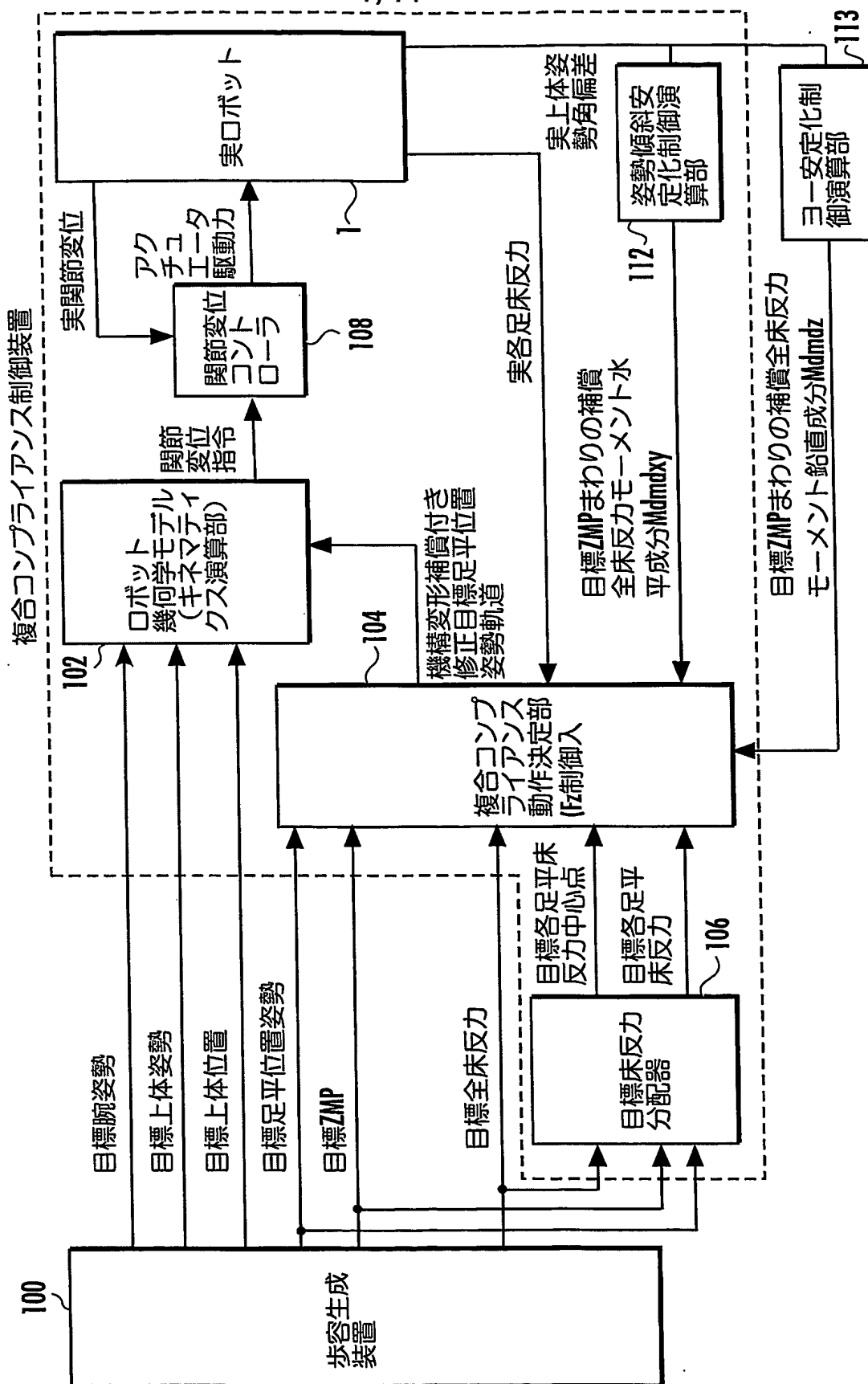
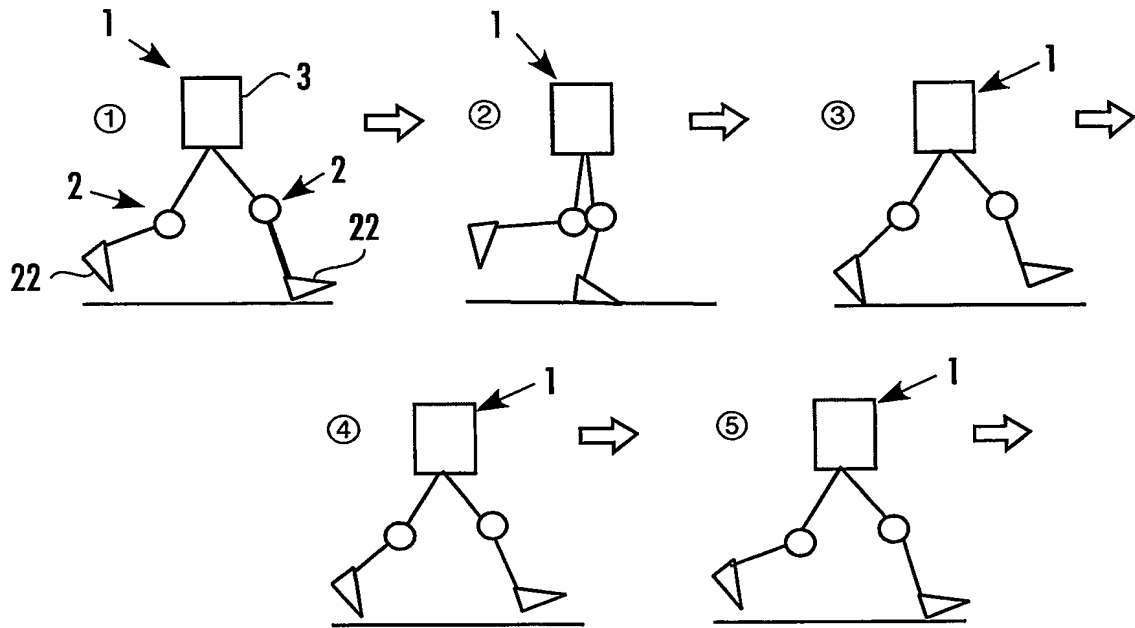


FIG.5



6/74

FIG.6

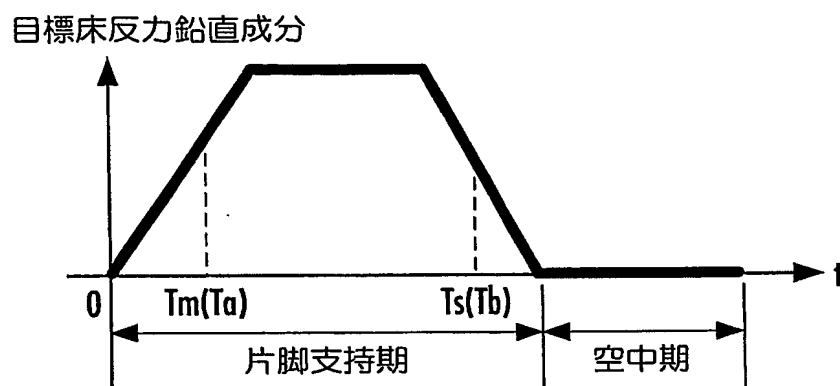
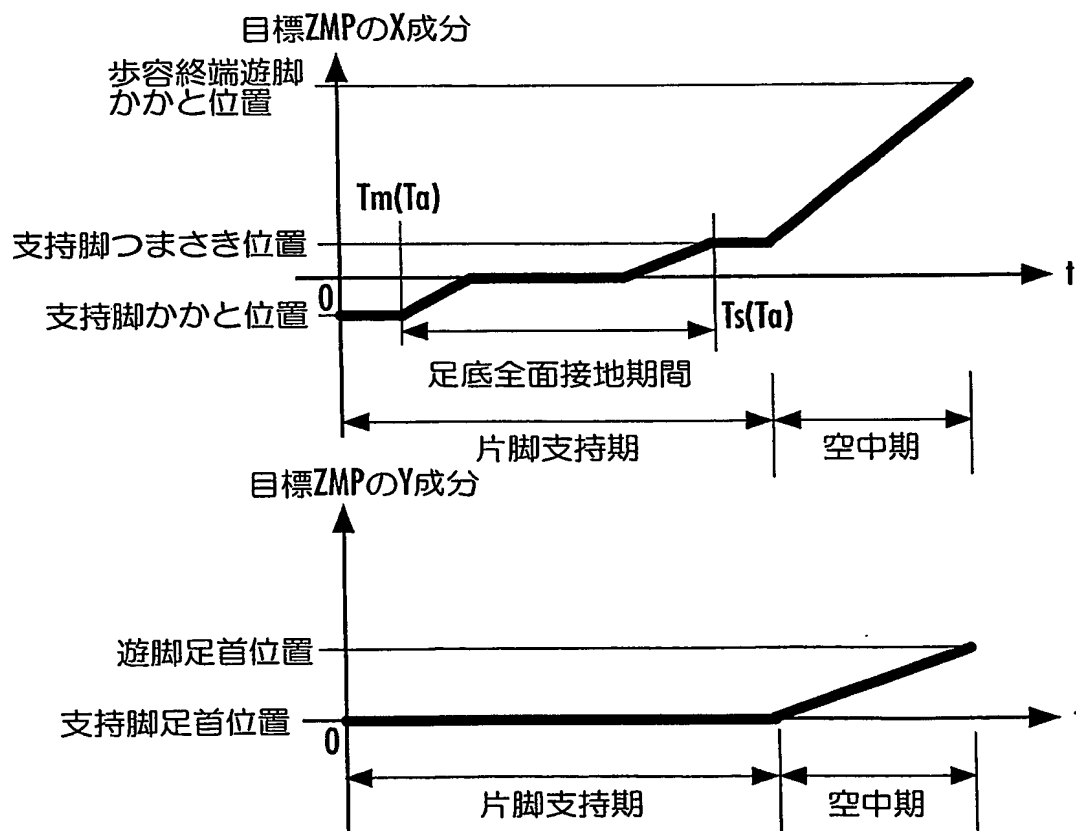
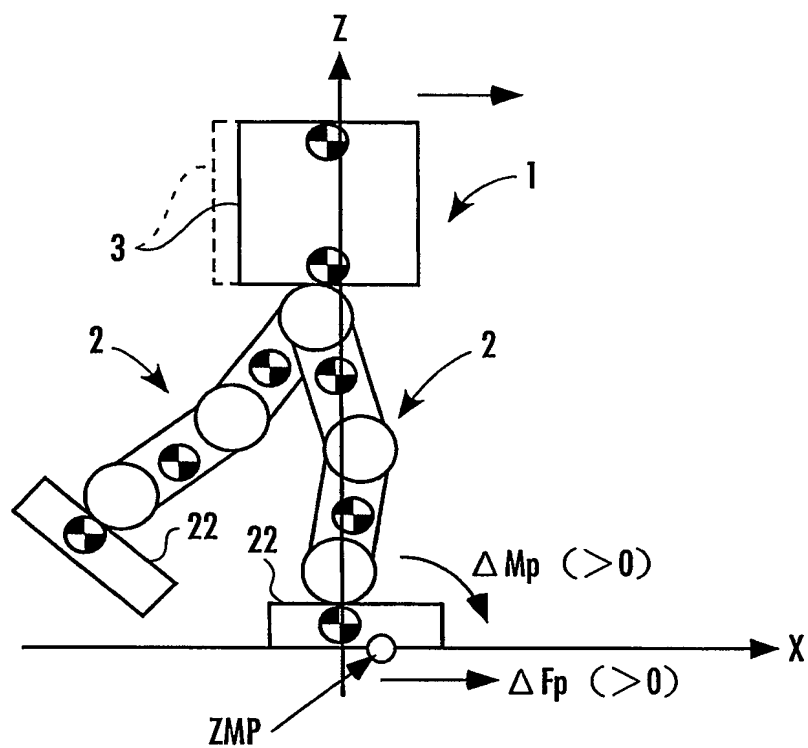


FIG.7



7 / 74

FIG.8



8 / 74

FIG.9

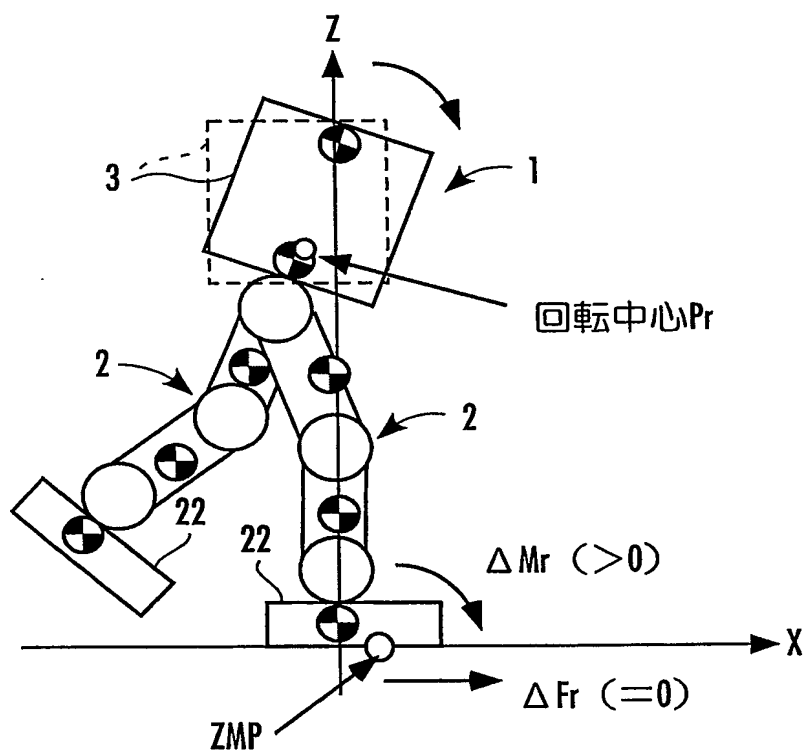
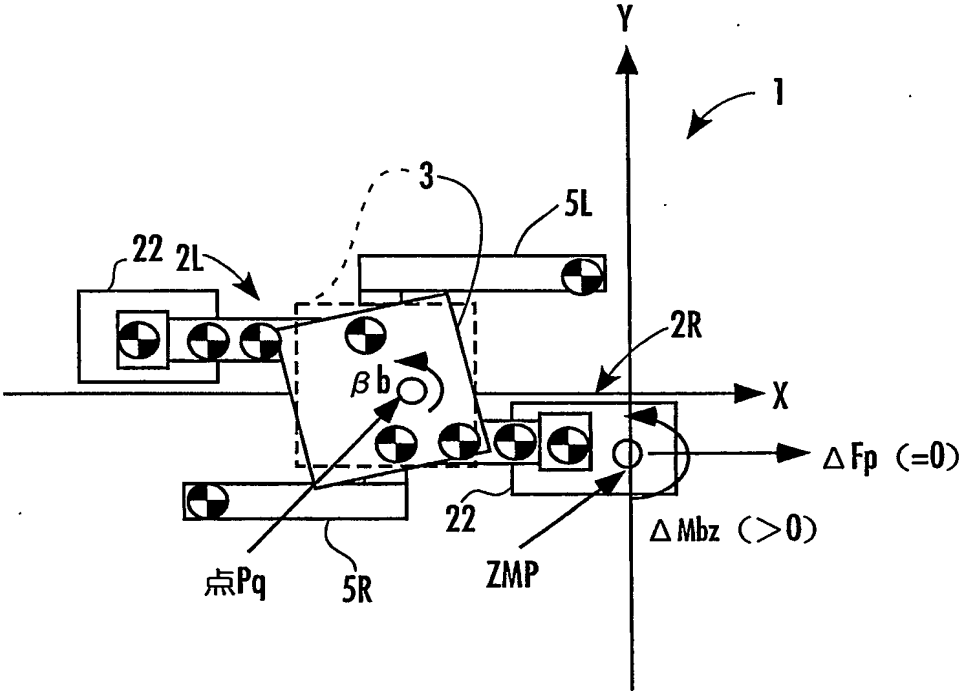


FIG.10





10 / 74

FIG.11(a)

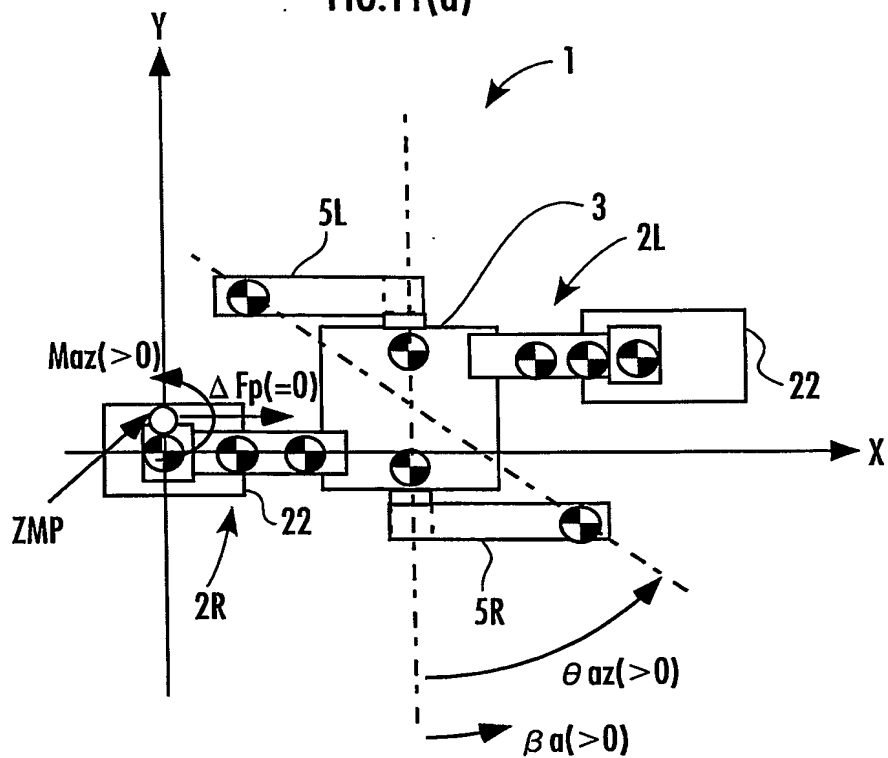
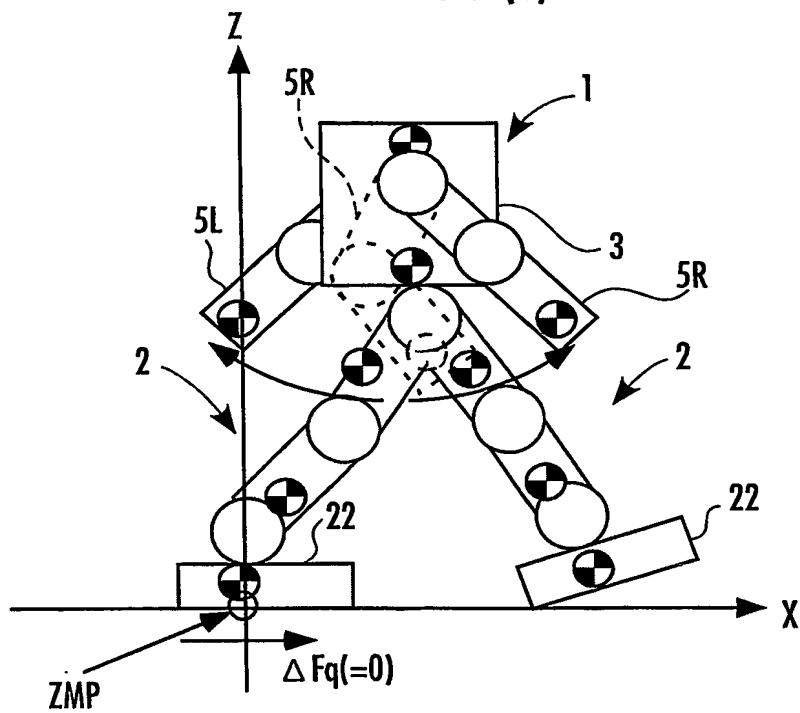
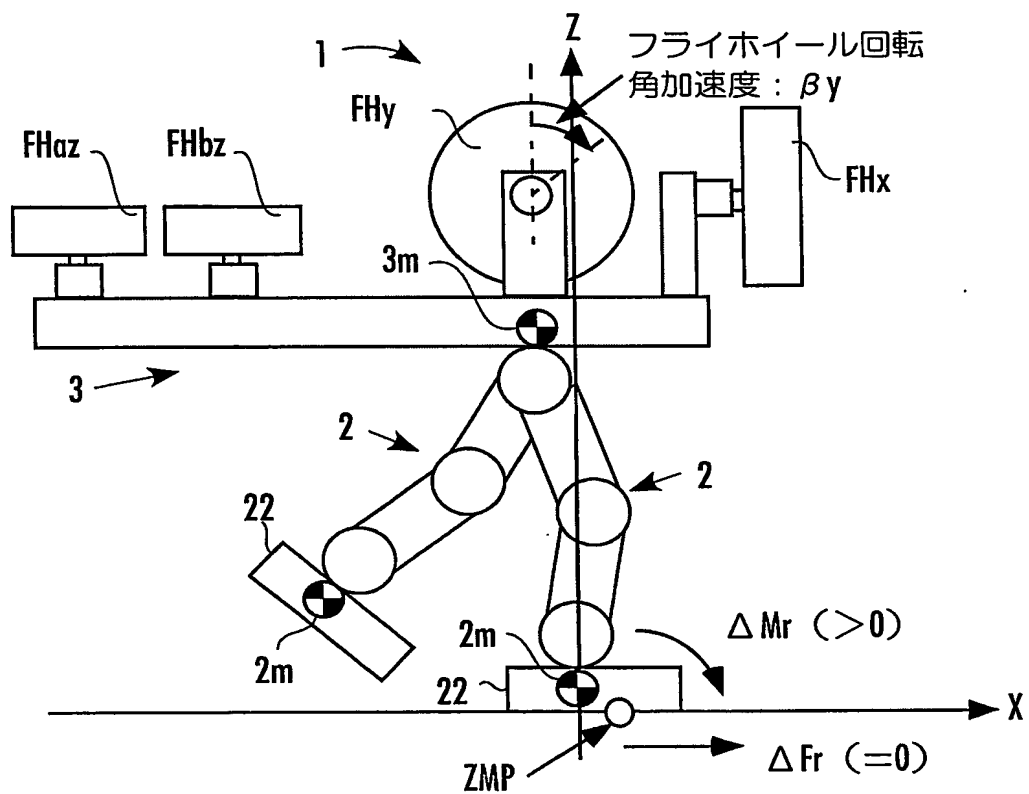


FIG.11(b)



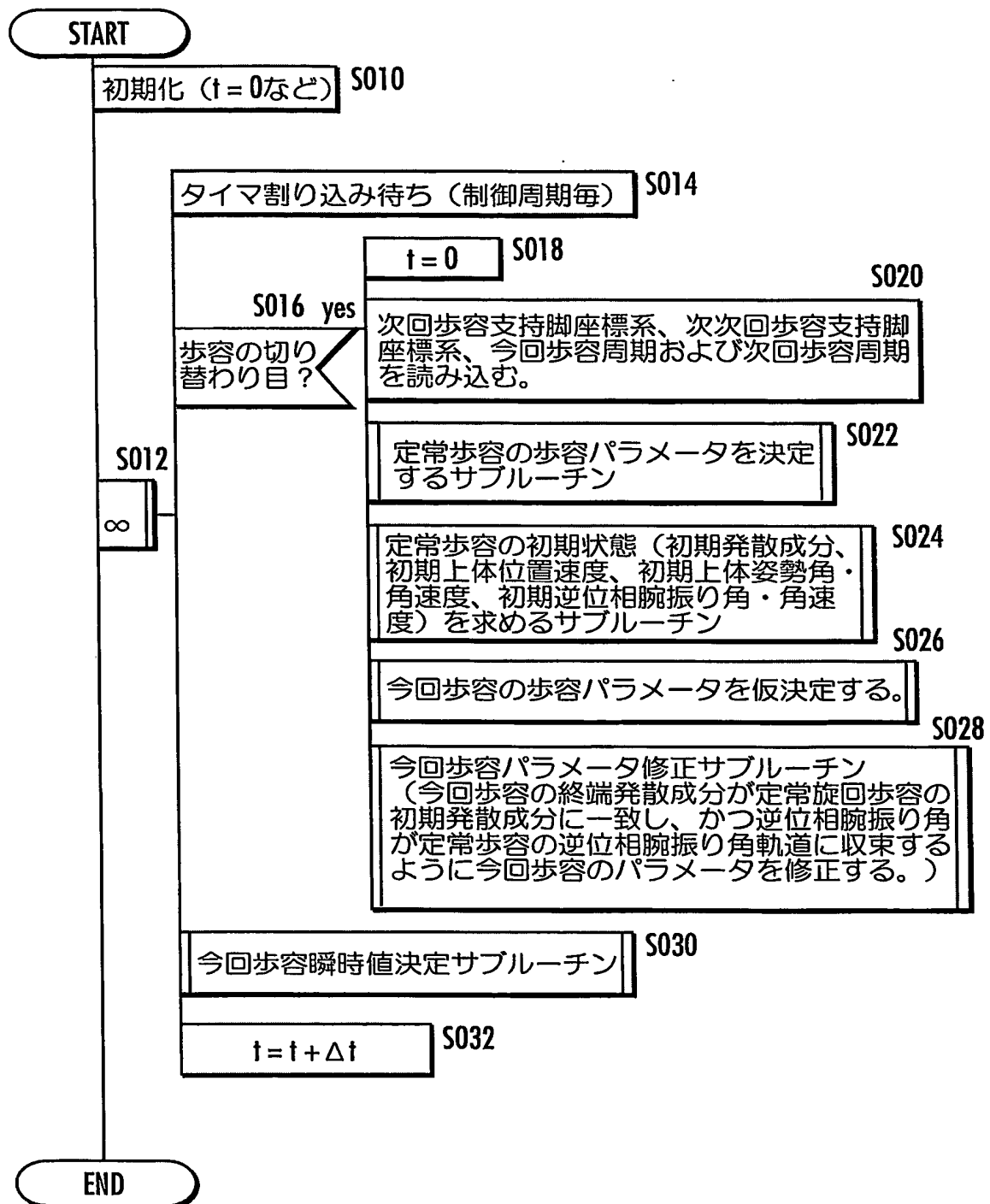
11/74

FIG.12



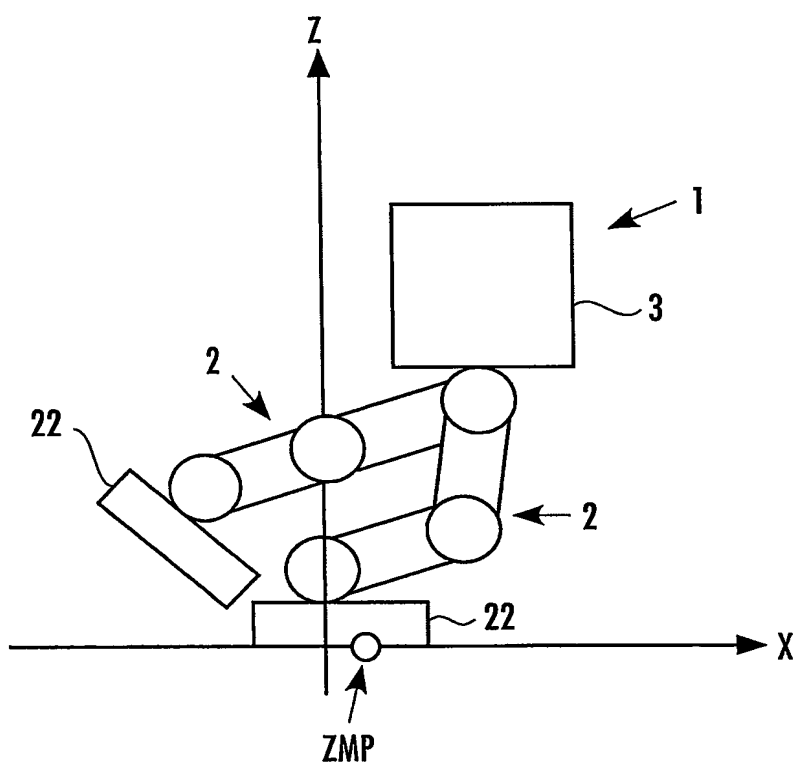
12/74

FIG.13



13/74

FIG.14



14 / 74

FIG.15

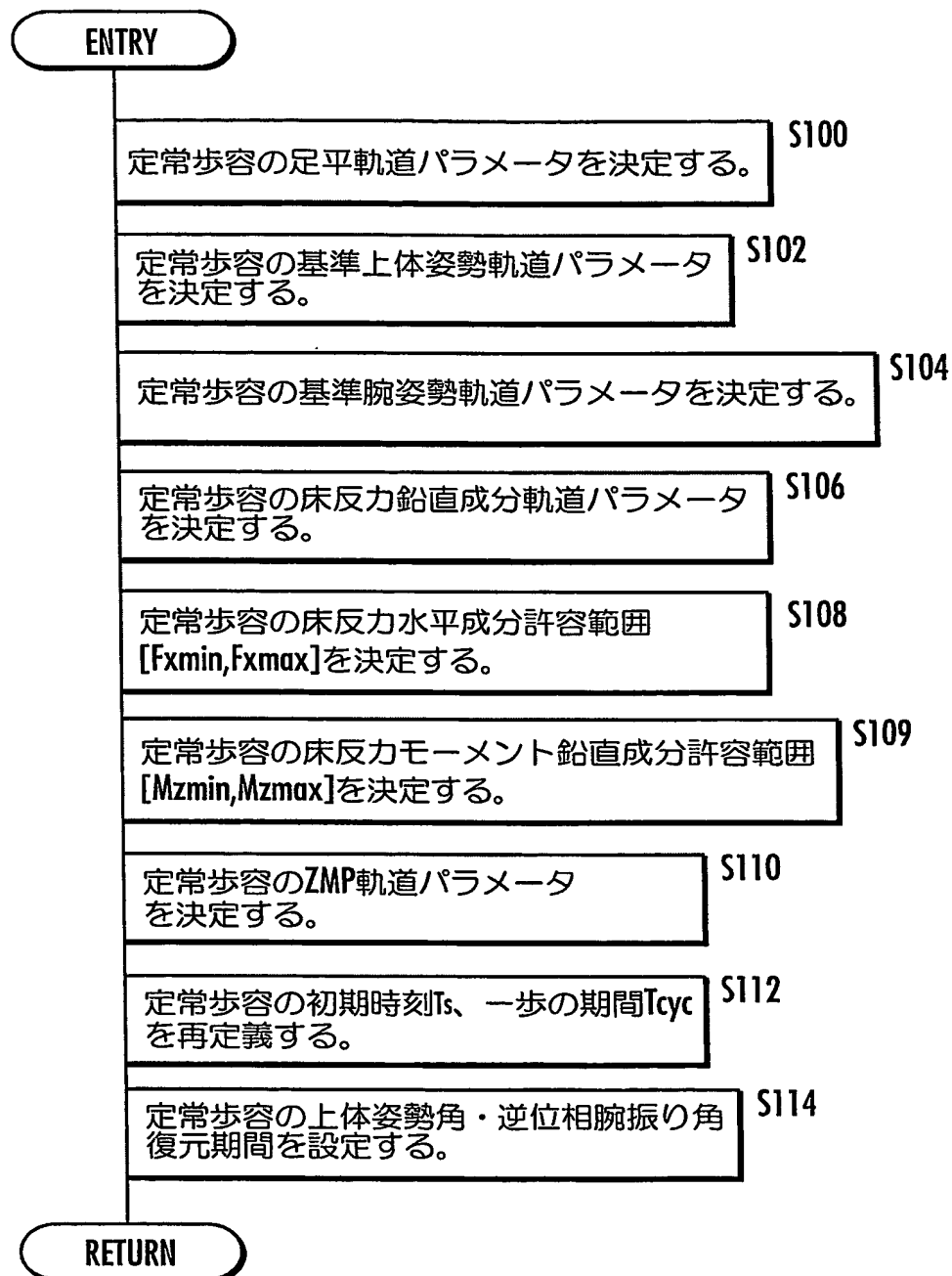
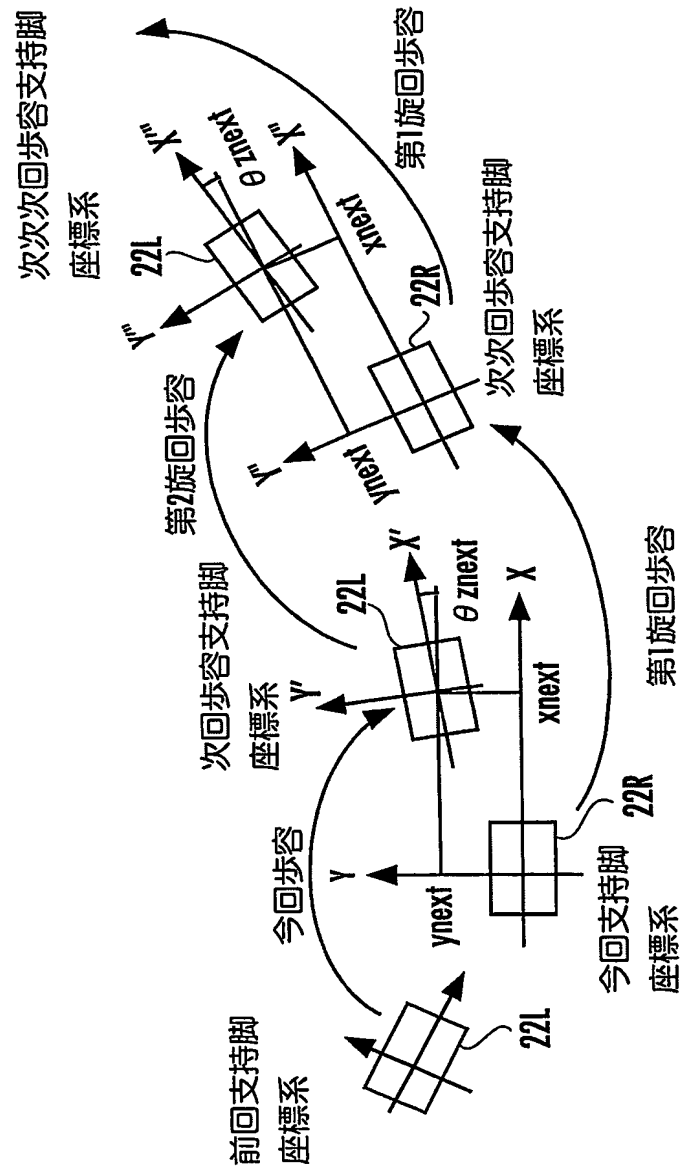
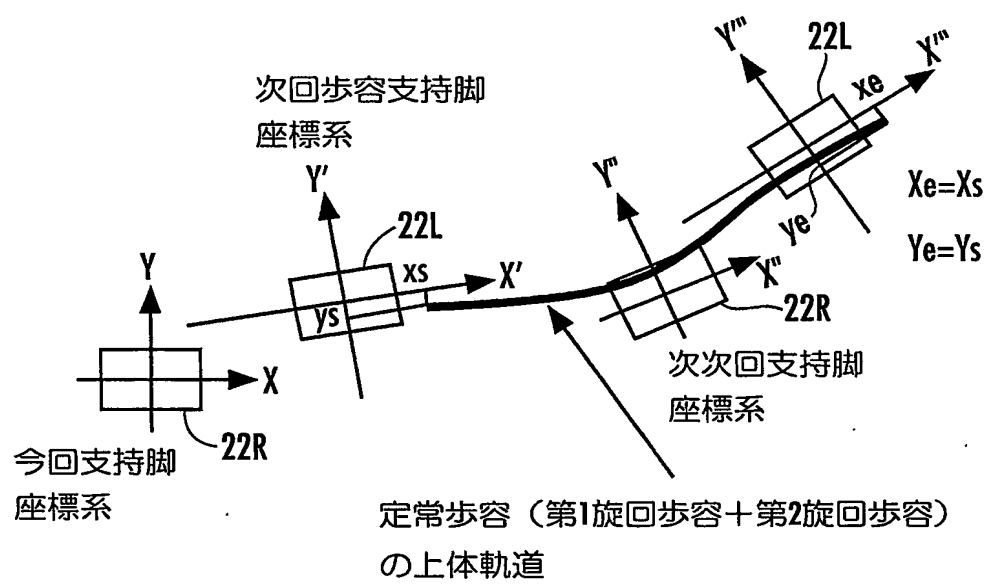


FIG.16



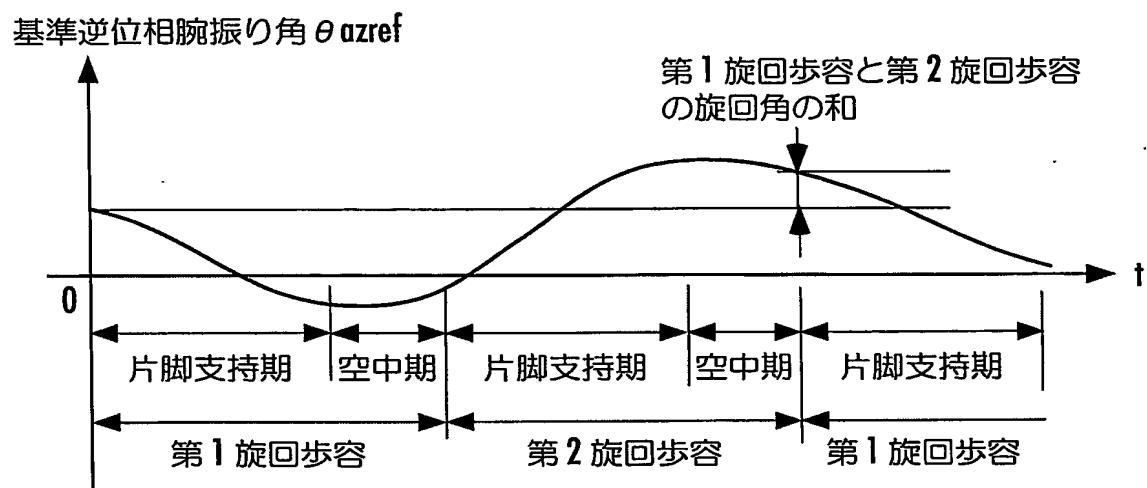
16/74

FIG.17



17/74

FIG.18





18/74

FIG.19

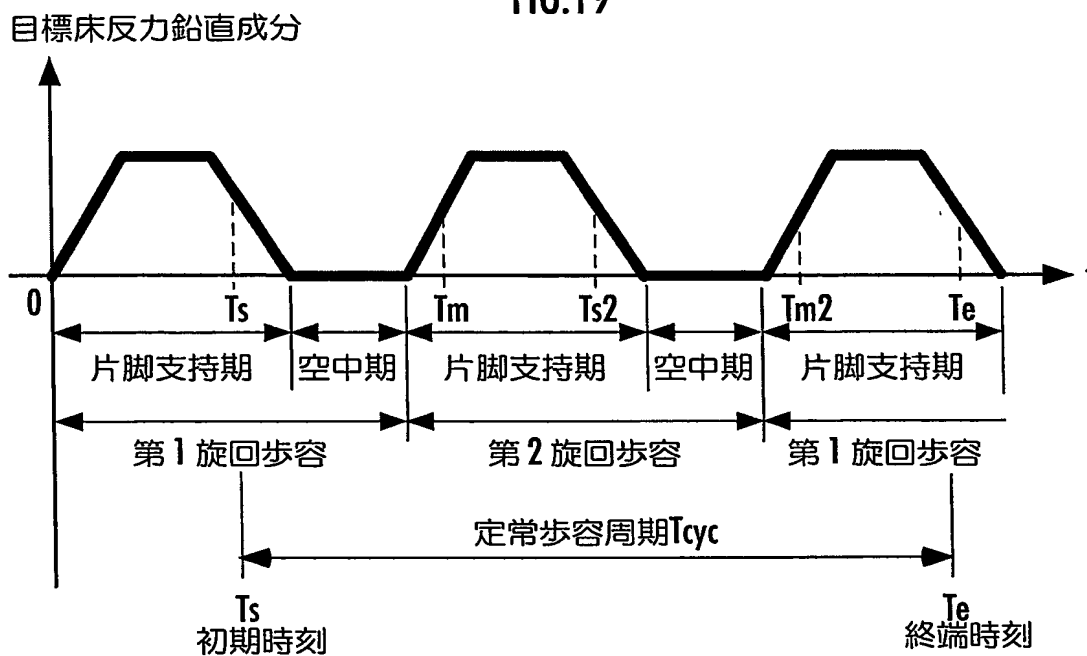
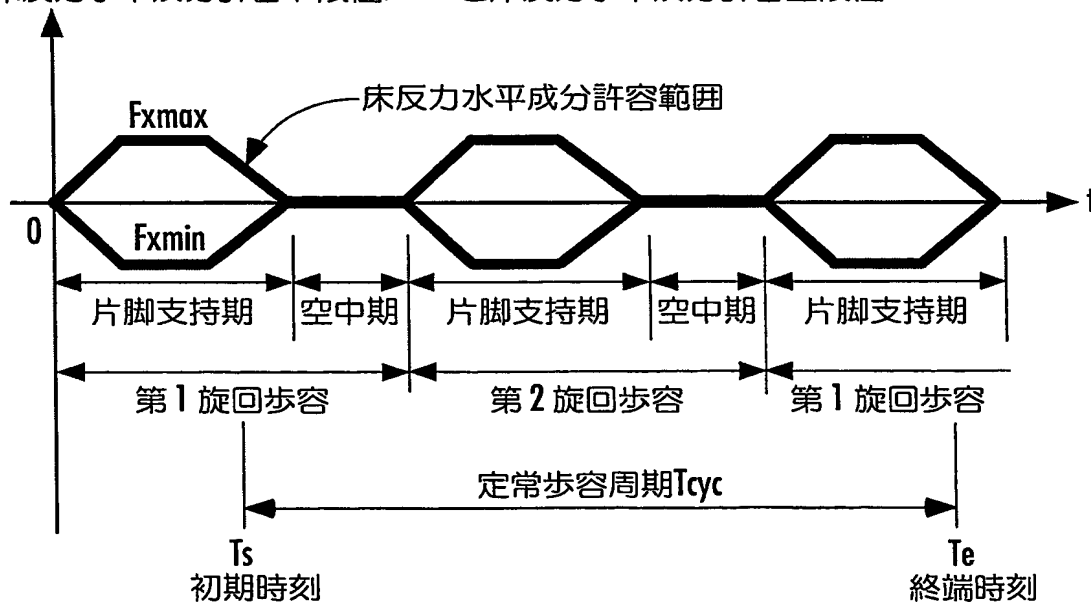


FIG.20

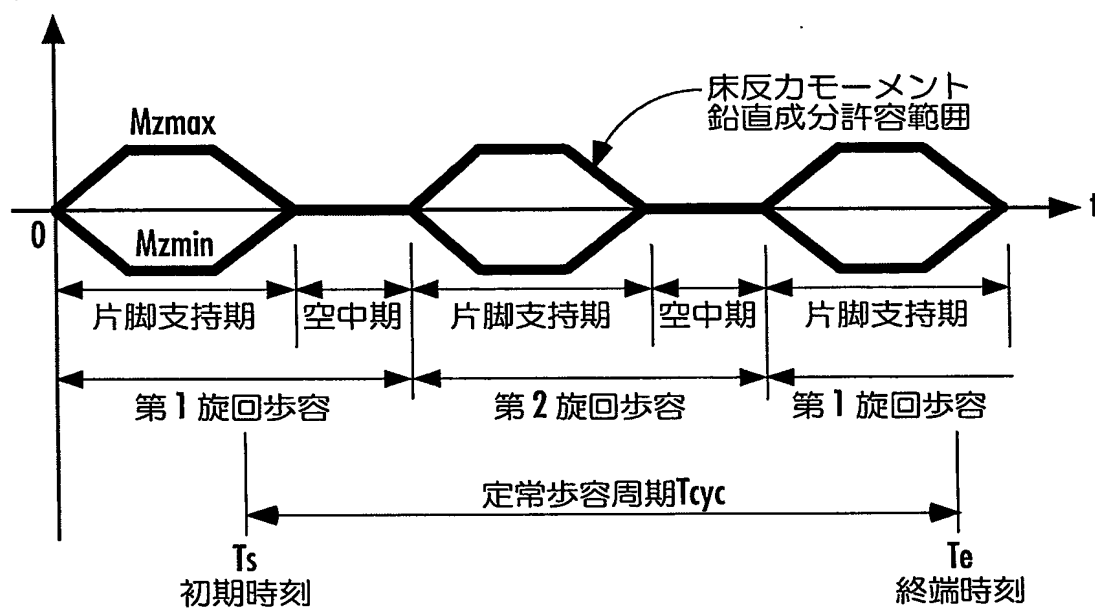
床反力水平成分許容下限値 $F_{xmin}$ と床反力水平成分許容上限値 $F_{xmax}$



19 / 74

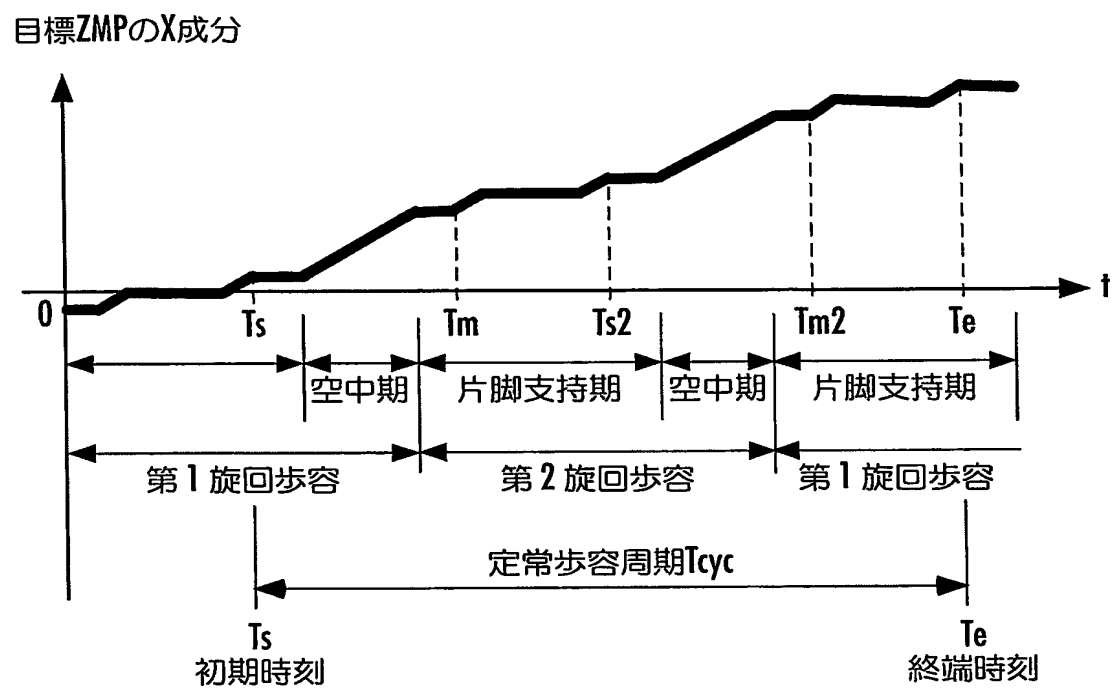
FIG.21

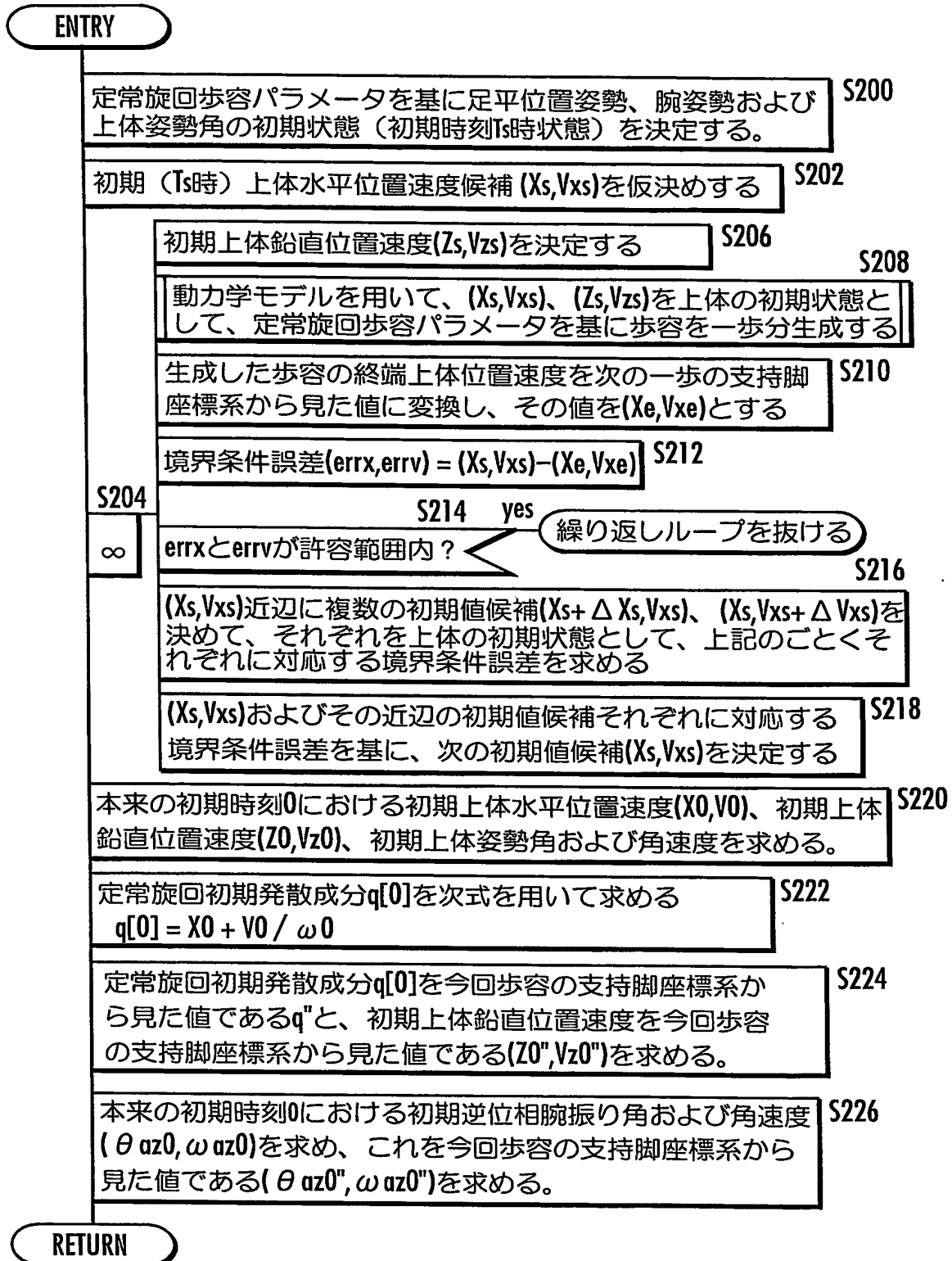
床反力モーメント鉛直成分許容下限値 $M_{zmin}$ と  
床反力モーメント鉛直成分許容上限値 $M_{zmax}$



20 / 74

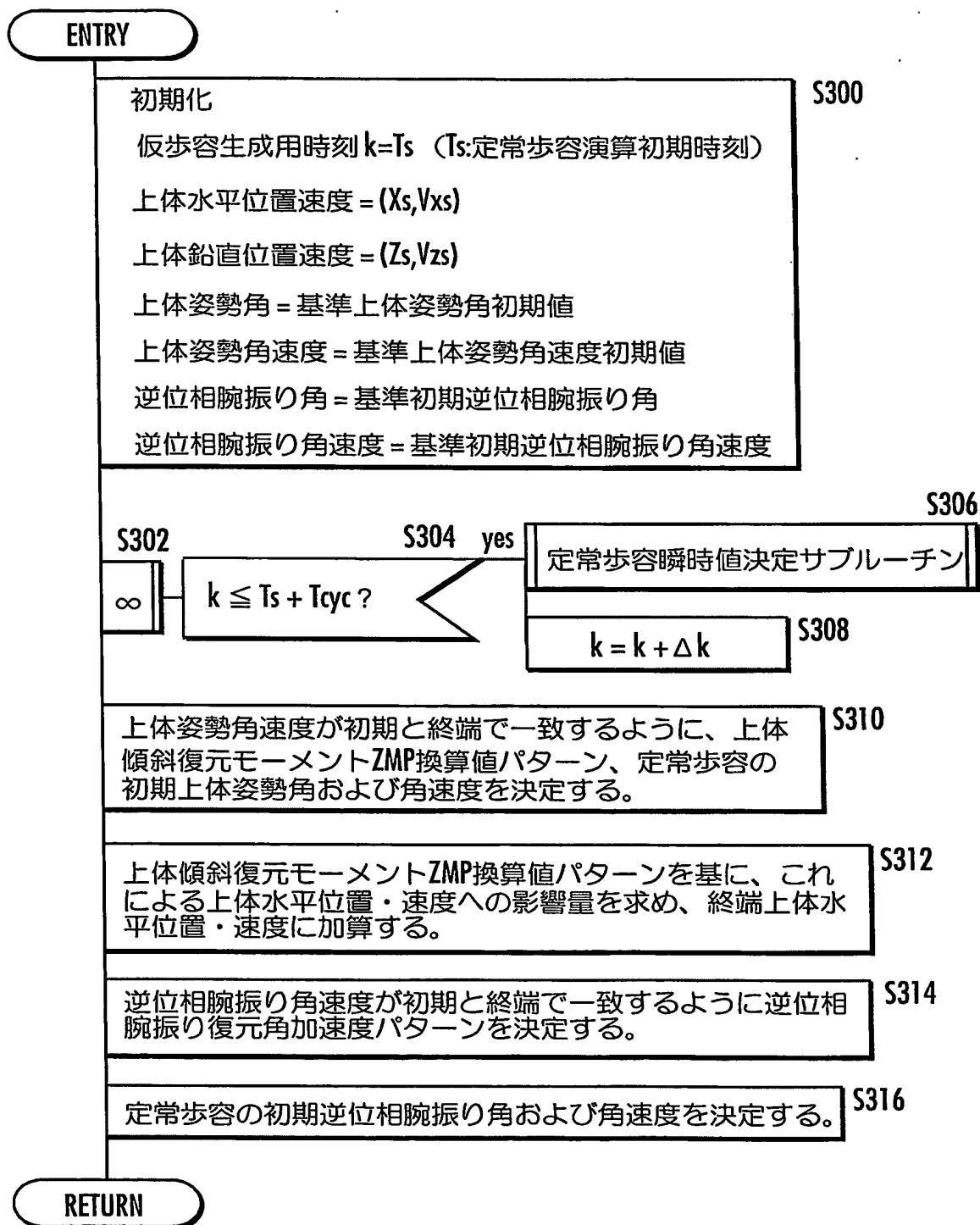
FIG.22

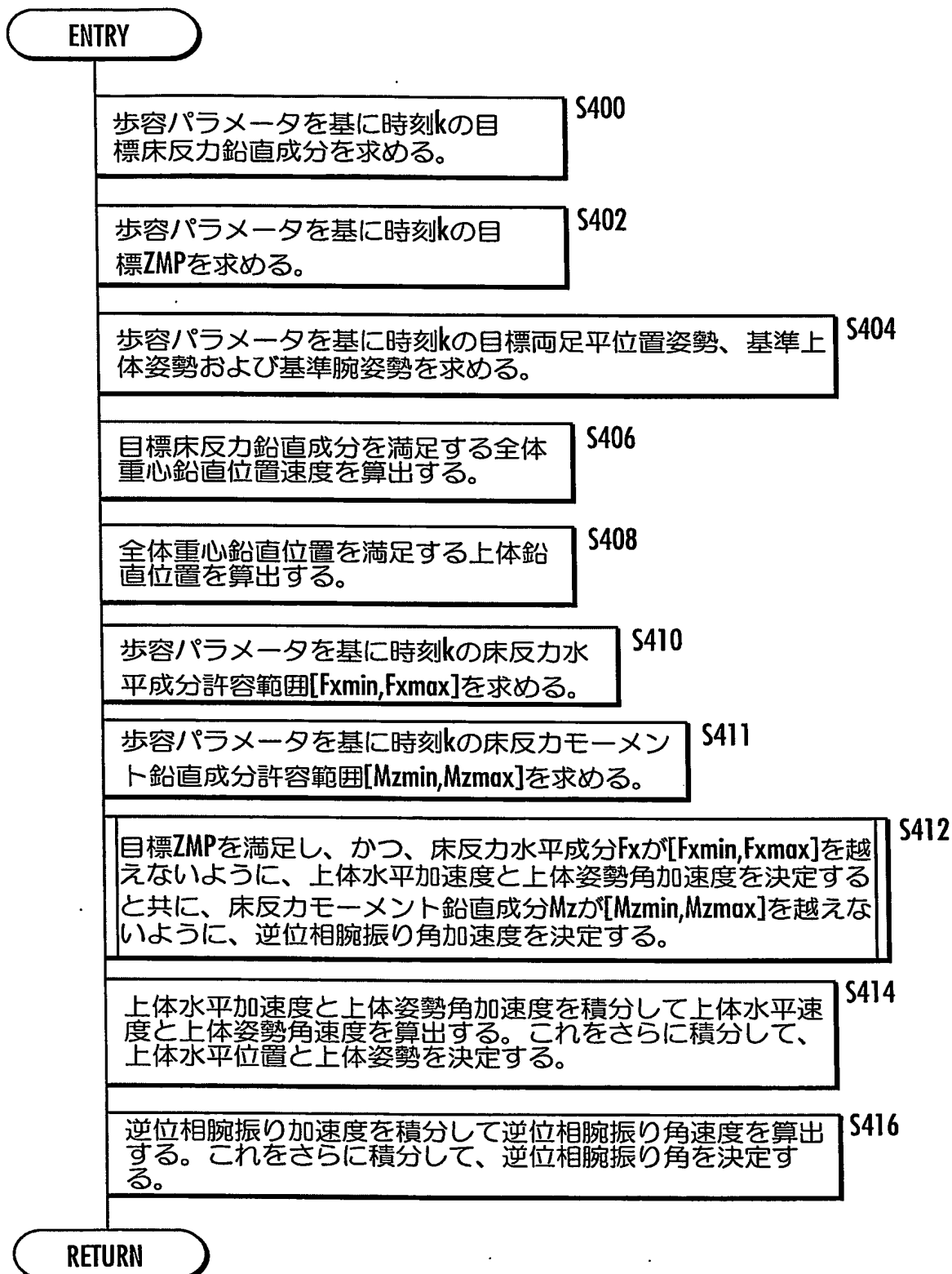


21 / 74  
FIG.23

22 / 74

FIG.24



23 / 74  
FIG.25

24 / 74  
FIG.26

ENTRY

S500  
目標上体ヨー角に時刻kでの基準上体ヨー角の値を代入する。  
逆位相腕振り角・角速度を除き、目標腕姿勢に時刻kでの基準腕姿勢の値を代入する。

S502

no

時刻kが、  
上体姿勢  
角・逆相  
腕振り角復  
元期間  
の間にある  
か？

S504  
仮に上体並進モードの運動をさせた場合に  
今回（時刻k）目標ZMPを満足するため  
に必要な上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を求める。

S506  
上体水平加速度が  $\alpha_{tmp}$  の場合の  
床反力水平成分  $F_{xtmp}$  を求める。

S508  $F_{xtmp} > F_{xmax}$ 

S510  
床反力の水平成分  $F_x$   
を次式で決定する。  
 $F_x = F_{xmax}$

 $F_{xtmp} < F_{xmin}$ 

S512  
 $F_x = F_{xmin}$

else

S514  
 $F_x = F_{xtmp}$

S516  
上体並進モードの上体水平加速度  $\alpha$  と上体回  
転モードの上体角加速度  $\beta$  を次式で決定する。  
 $\alpha = \alpha_{tmp} + (F_x - F_{xtmp}) / \Delta F_p$   
 $\beta = (\alpha_{tmp} - \alpha) * \Delta M_p / \Delta M_r$

S518  
仮に上体並進モードの上体水平加速度が  $\alpha$ 、上体回転モー  
ドの上体角加速度が  $\beta$ 、上体ヨー回転モードの上体ヨー角  
加速度が  $\beta_{bref}$ 、逆位相腕振り角加速度が  $\beta_{aref}$  の運動をさ  
せた場合の床反力モーメント鉛直成分  $M_{ztmp}$  を求める。

S520  $M_{ztmp} > M_{zmax}$ 

S522  
床反力モーメント鉛直成  
分  $M_z$  を次式で決定する。  
 $M_z = M_{zmax}$

 $M_{ztmp} < M_{zmin}$ 

S524  
 $M_z = M_{zmin}$

else

S526  
 $M_z = M_{ztmp}$

S528  
逆位相腕振り角加速度  $\beta_a$  を次式で決定する。  
 $\beta_a = \beta_{aref} + (M_z - M_{ztmp}) / \Delta M_a$

yes

S530  
上体並進モードの運動をさせた場合に  
今回（時刻k）目標ZMPを満足するため  
に必要な上体水平加速度  $\alpha$  を求める。

S532  
上体水平加速度が  $\alpha$  の場合の  
床反力水平成分  $F_x$  を求める。

 $\beta = 0$ 

S534

 $\beta_a = \beta_{aref}$ 

S536

RETURN

25 / 74

FIG.27

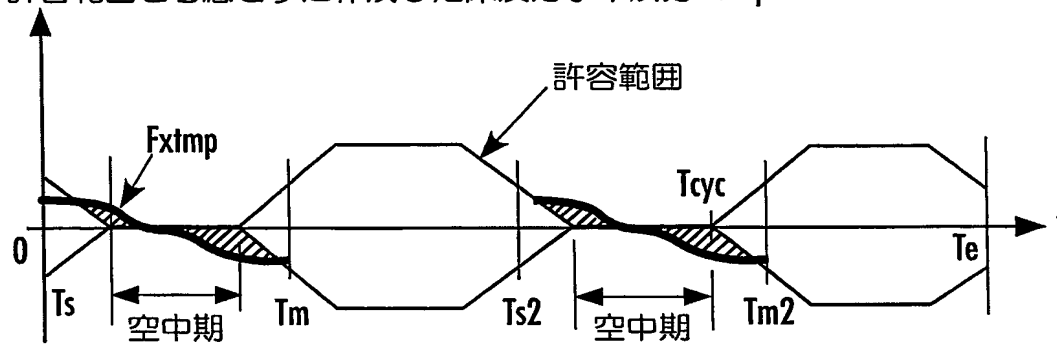
許容範囲を考慮せずに作成した床反力水平成分 $F_{xtmp}$ 

FIG.28

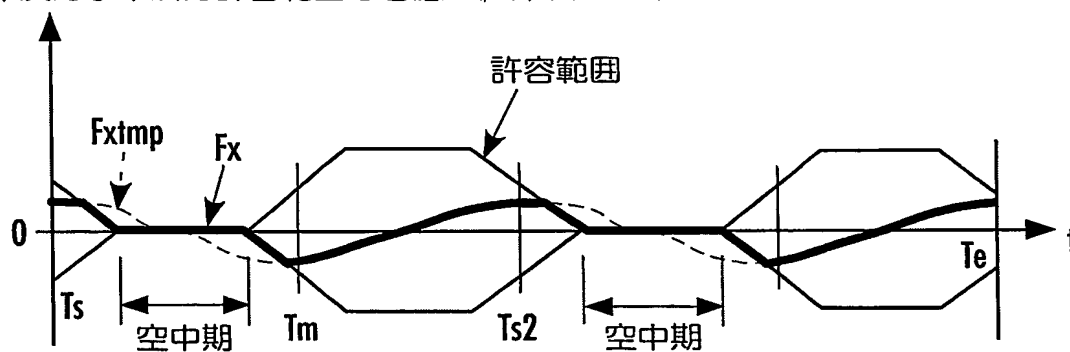
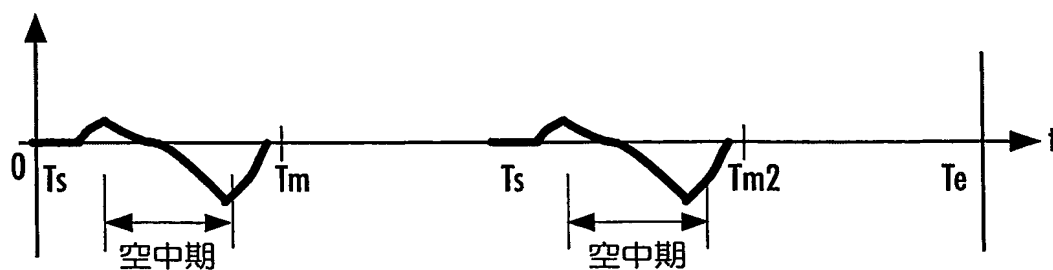
床反力水平成分許容範囲を考慮した床反力水平成分 $F_x$ 

FIG.29

上体傾斜角加速度  $\beta$ 



26 / 74

FIG.30

上体傾斜復元モーメントZMP換算値 (ZMPrec)

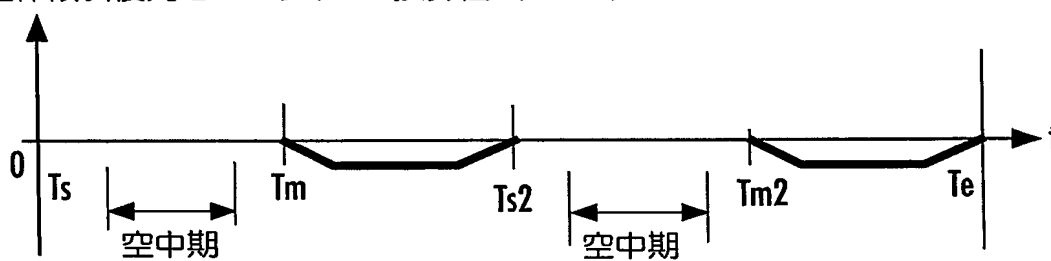
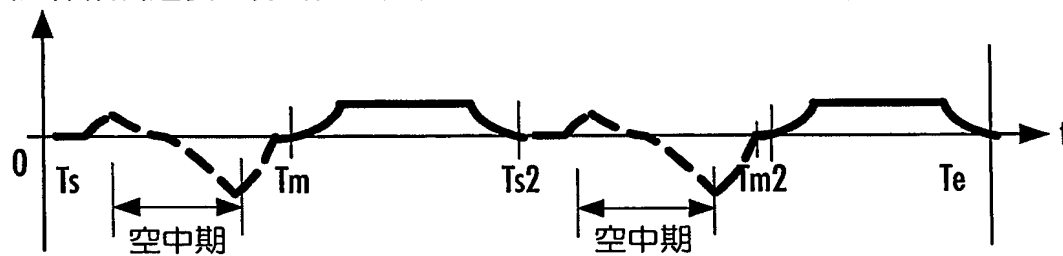


FIG.31

(上体傾斜速度を初期値に戻すための) 上体傾斜角加速度  $\beta$ 

27 / 74

FIG.32

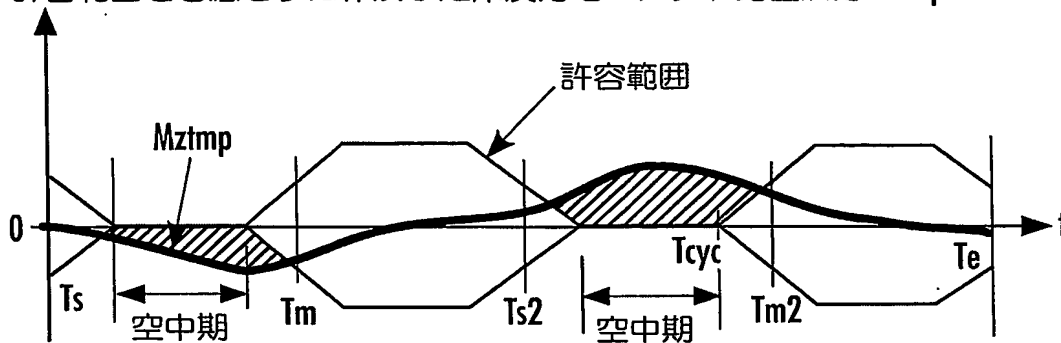
許容範囲を考慮せずに作成した床反力モーメント鉛直成分 $M_{ztmp}$ 

FIG.33

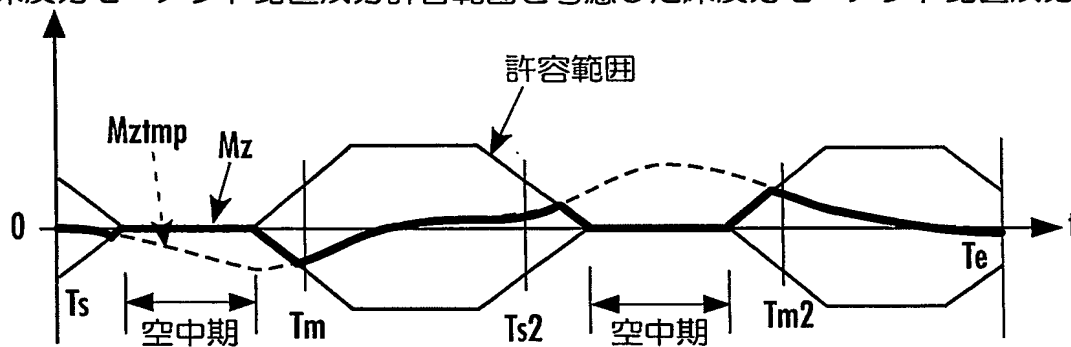
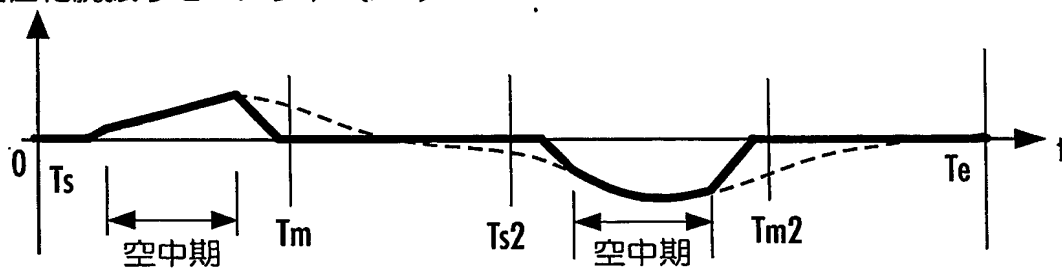
床反力モーメント鉛直成分許容範囲を考慮した床反力モーメント鉛直成分 $M_z$ 

FIG.34

逆位相腕振りモーメント ( $M_{az}$ )

28 / 74

FIG.35

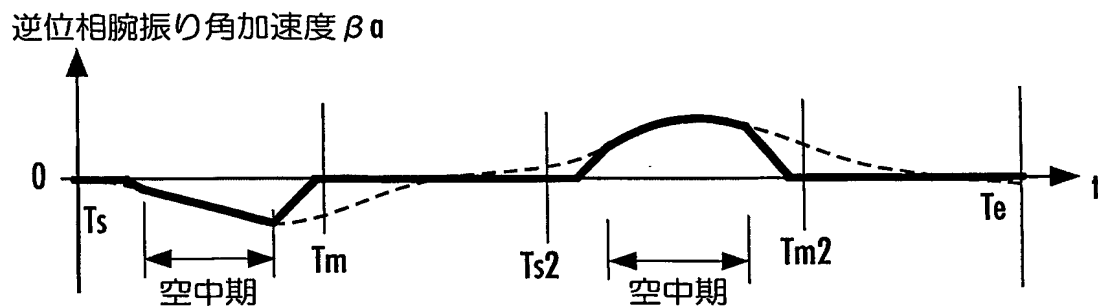


FIG.36

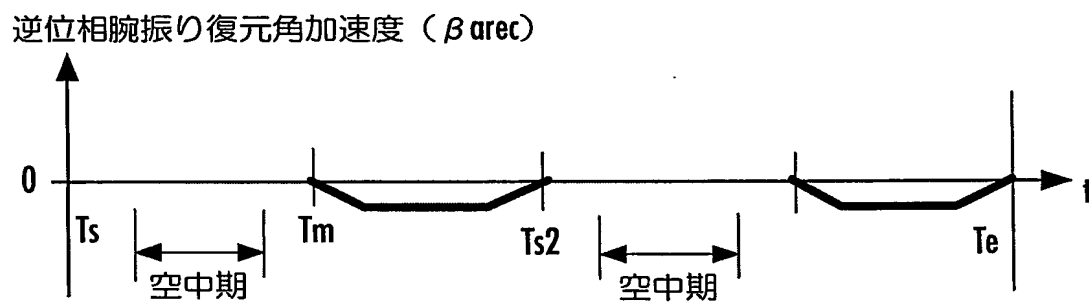
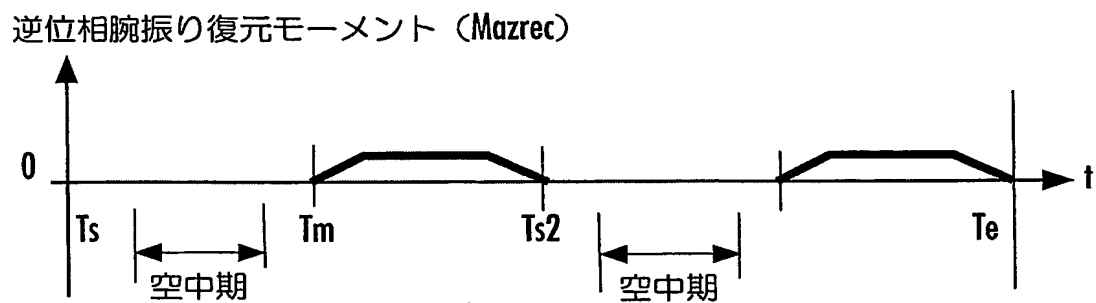
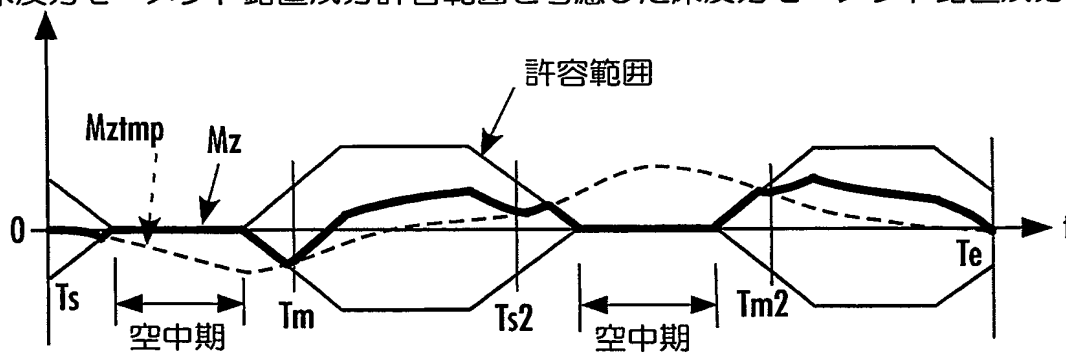


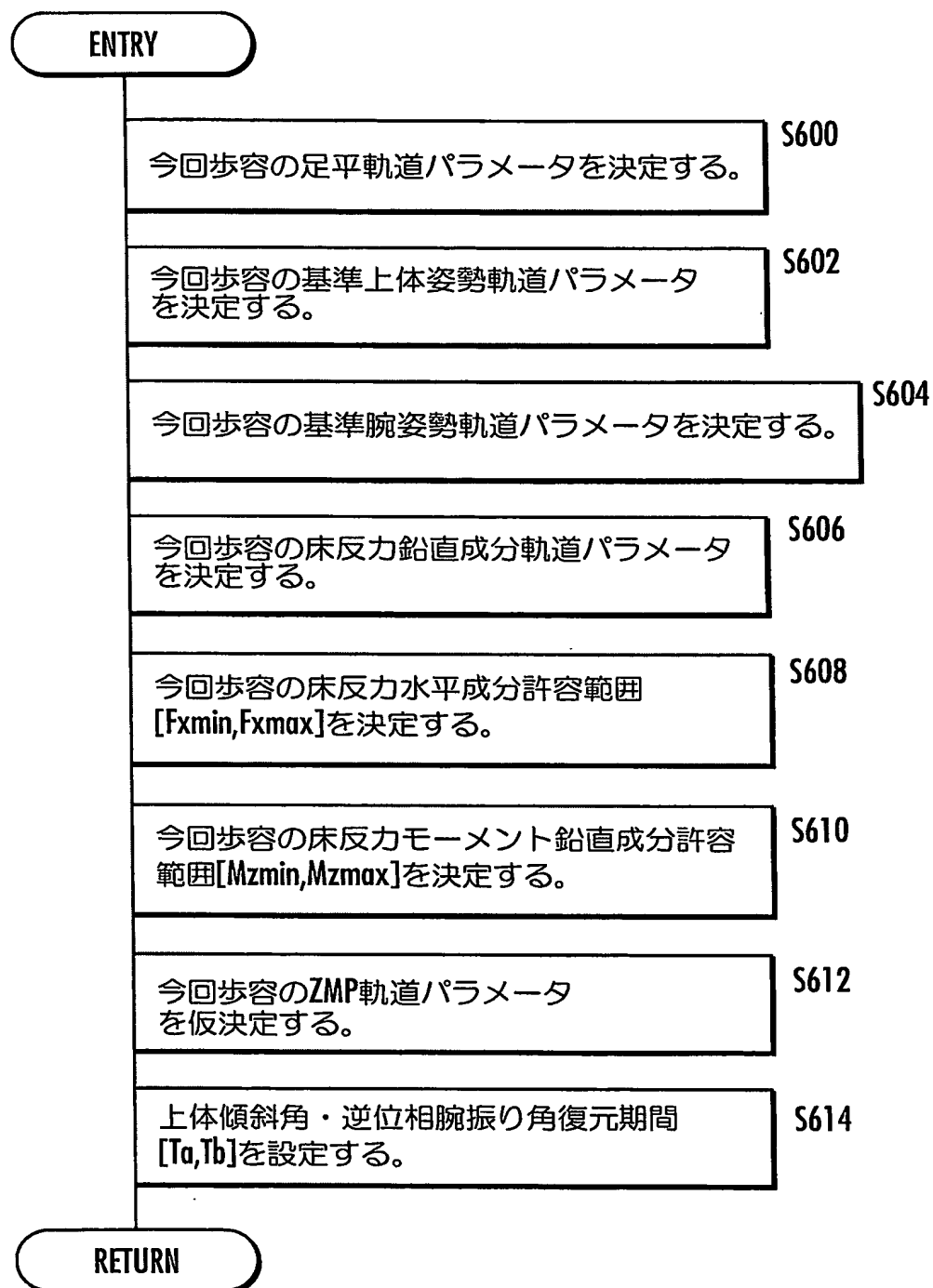
FIG.37



29 / 74

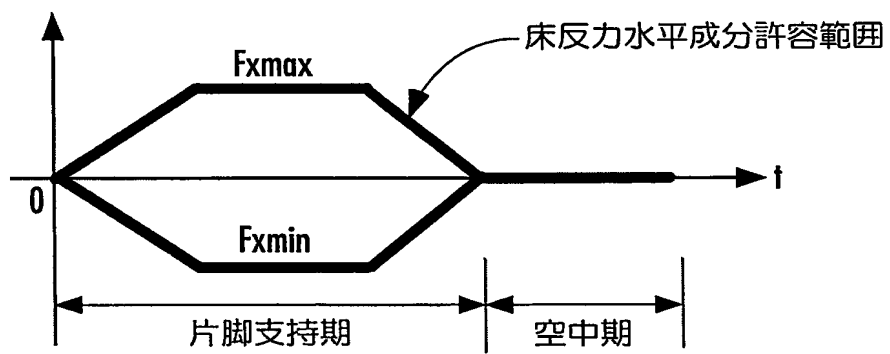
FIG.38

床反力モーメント鉛直成分許容範囲を考慮した床反力モーメント鉛直成分 $M_z$ 

30 / 74  
FIG.39

31 / 74

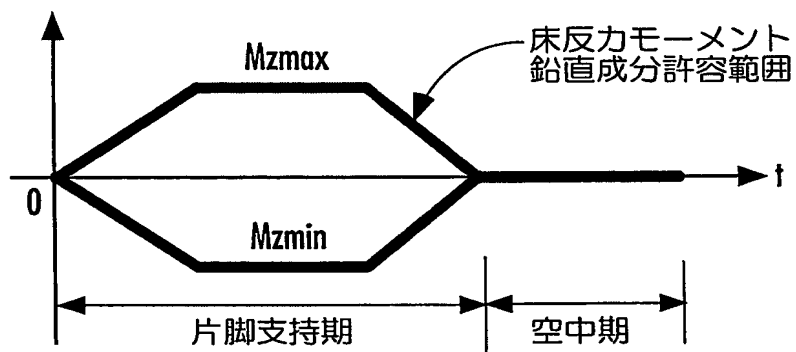
FIG.40

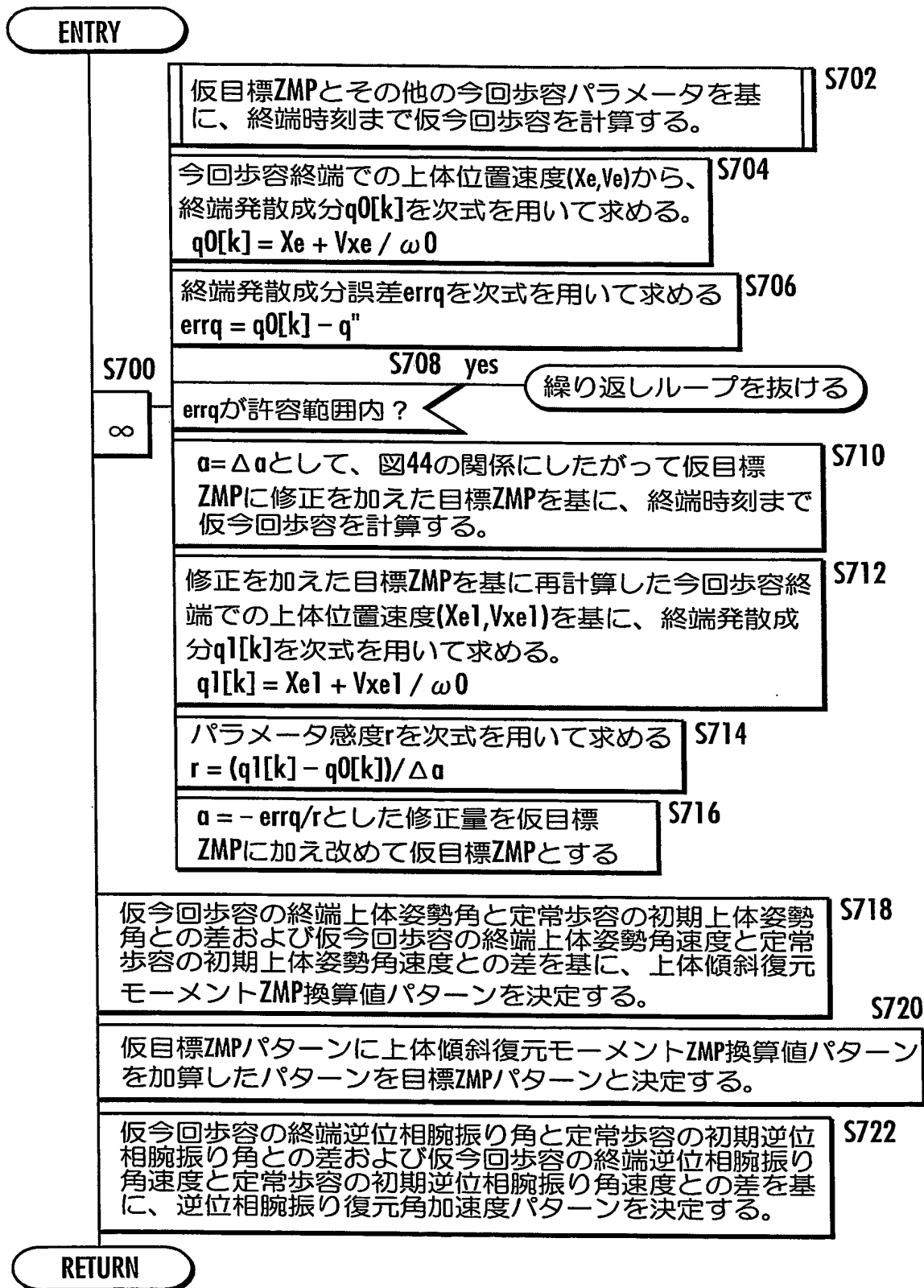
床反力水平成分許容下限値 $F_{xmin}$ と床反力水平成分許容上限値 $F_{xmax}$ 

32 / 74

FIG.41

床反力モーメント鉛直成分許容下限値 $M_{zmin}$ と  
床反力モーメント鉛直成分許容上限値 $M_{zmax}$

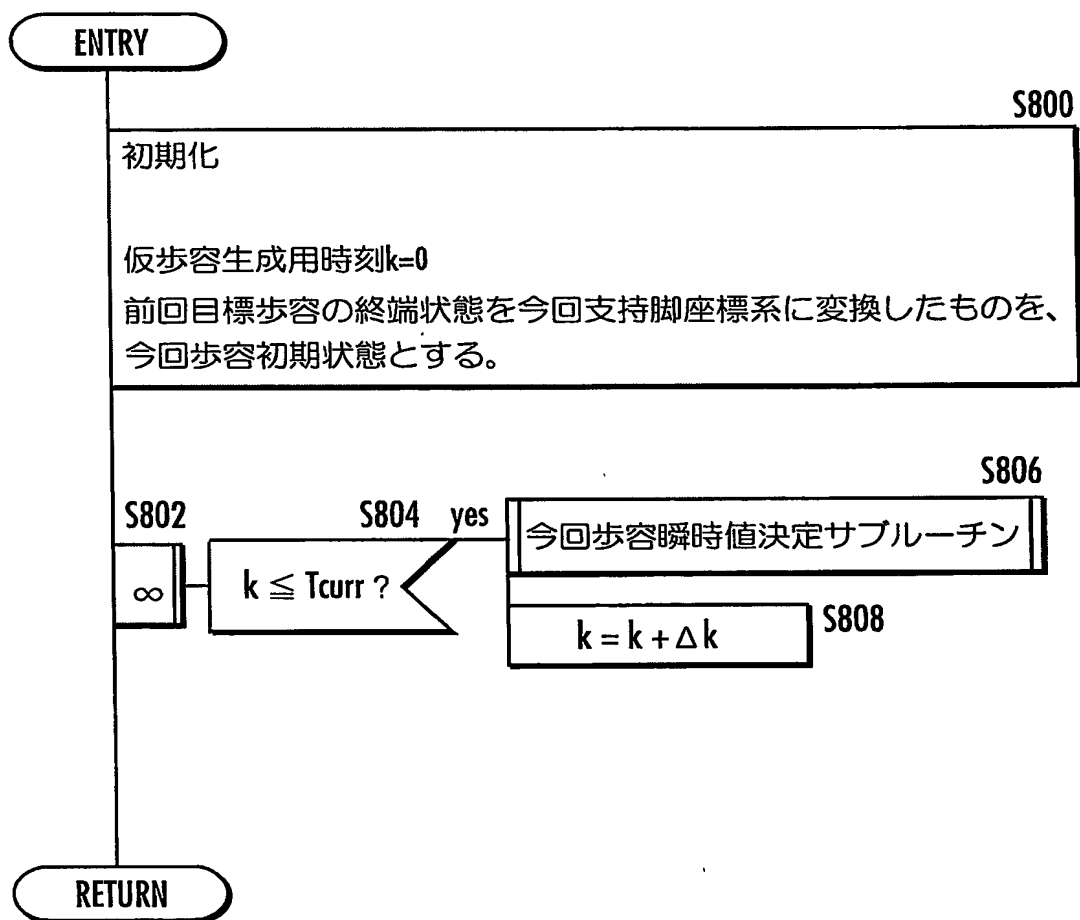


33 / 74  
FIG.42



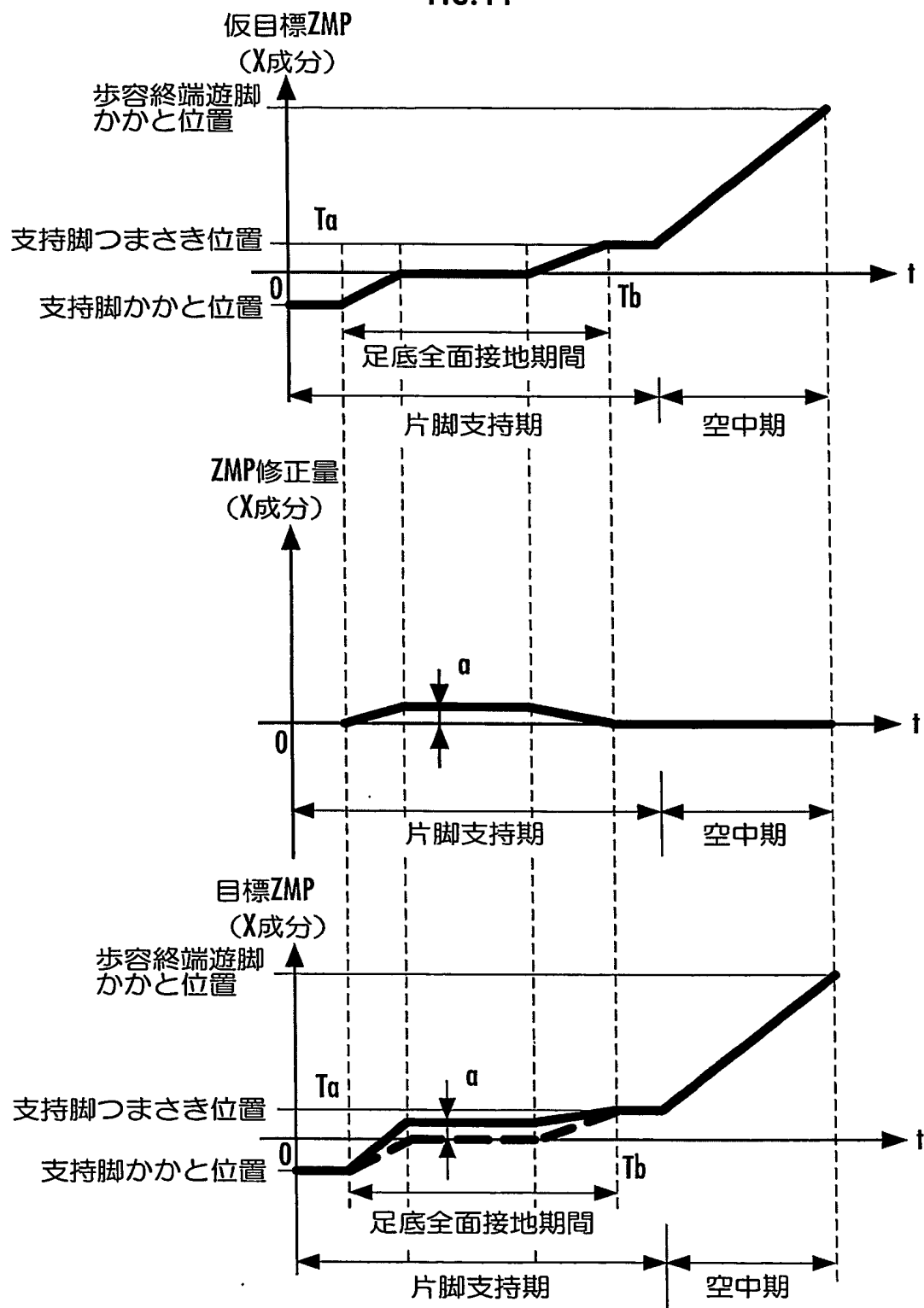
34 / 74

FIG.43



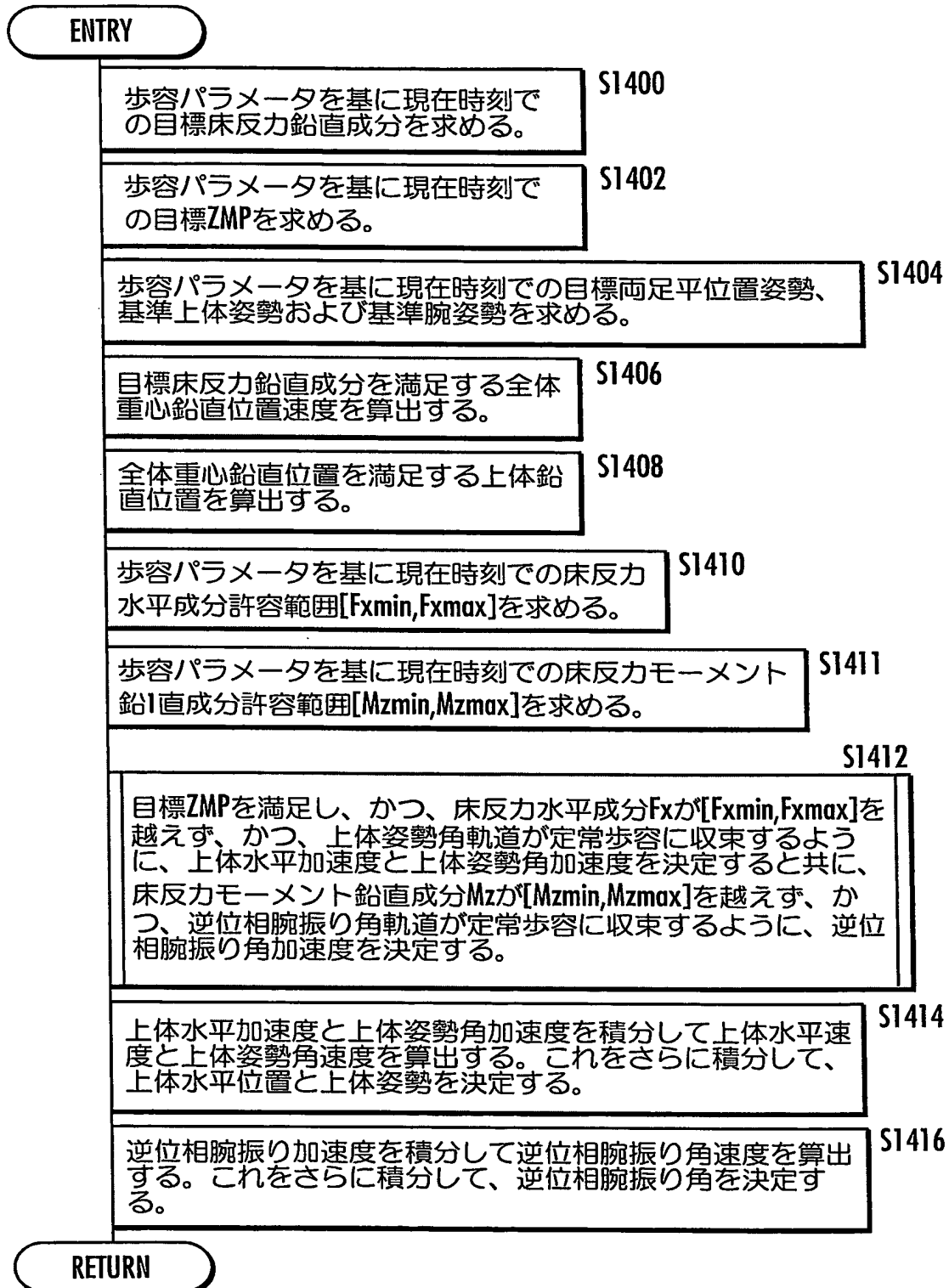
35/74

FIG.44



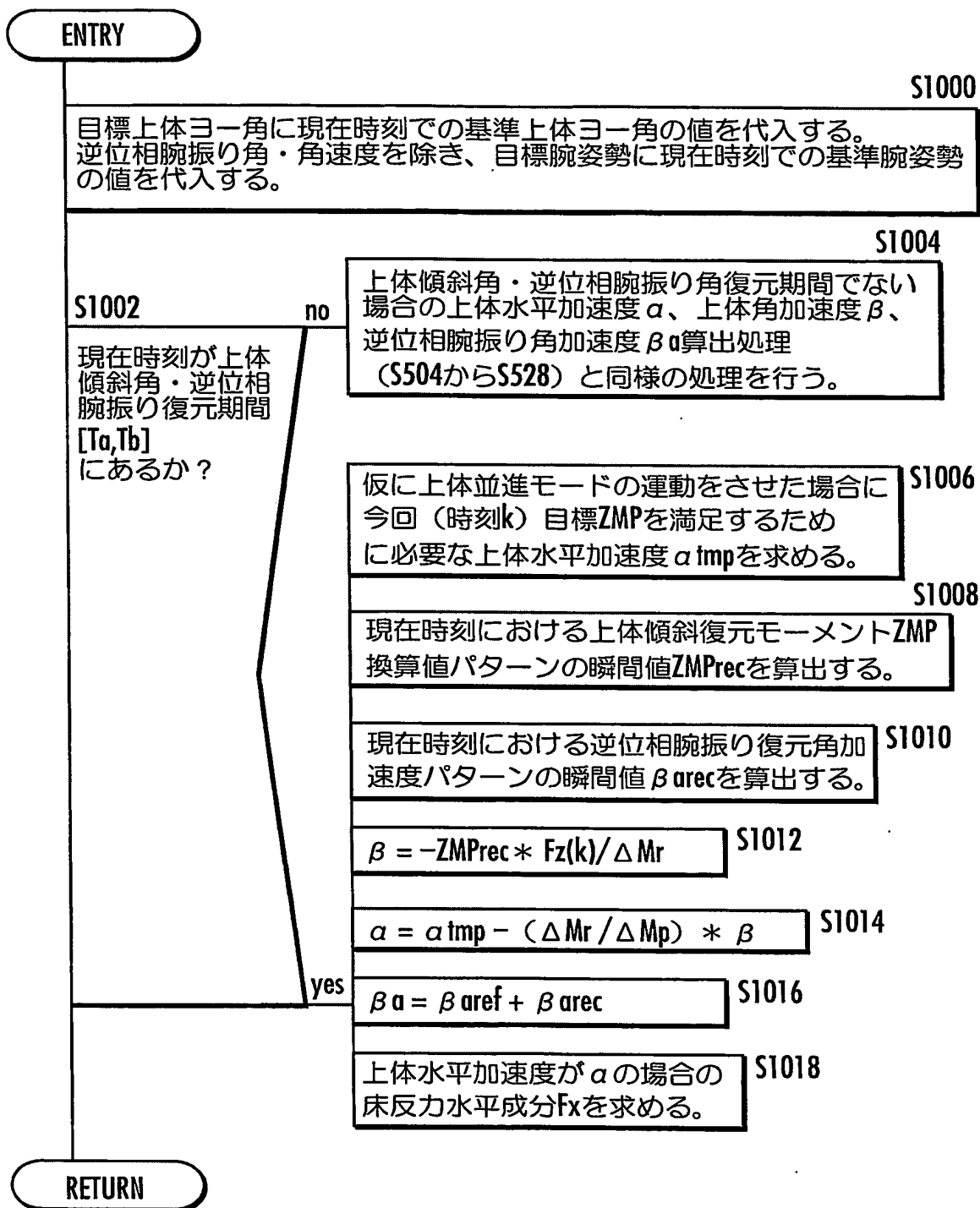
36 / 74

FIG.45



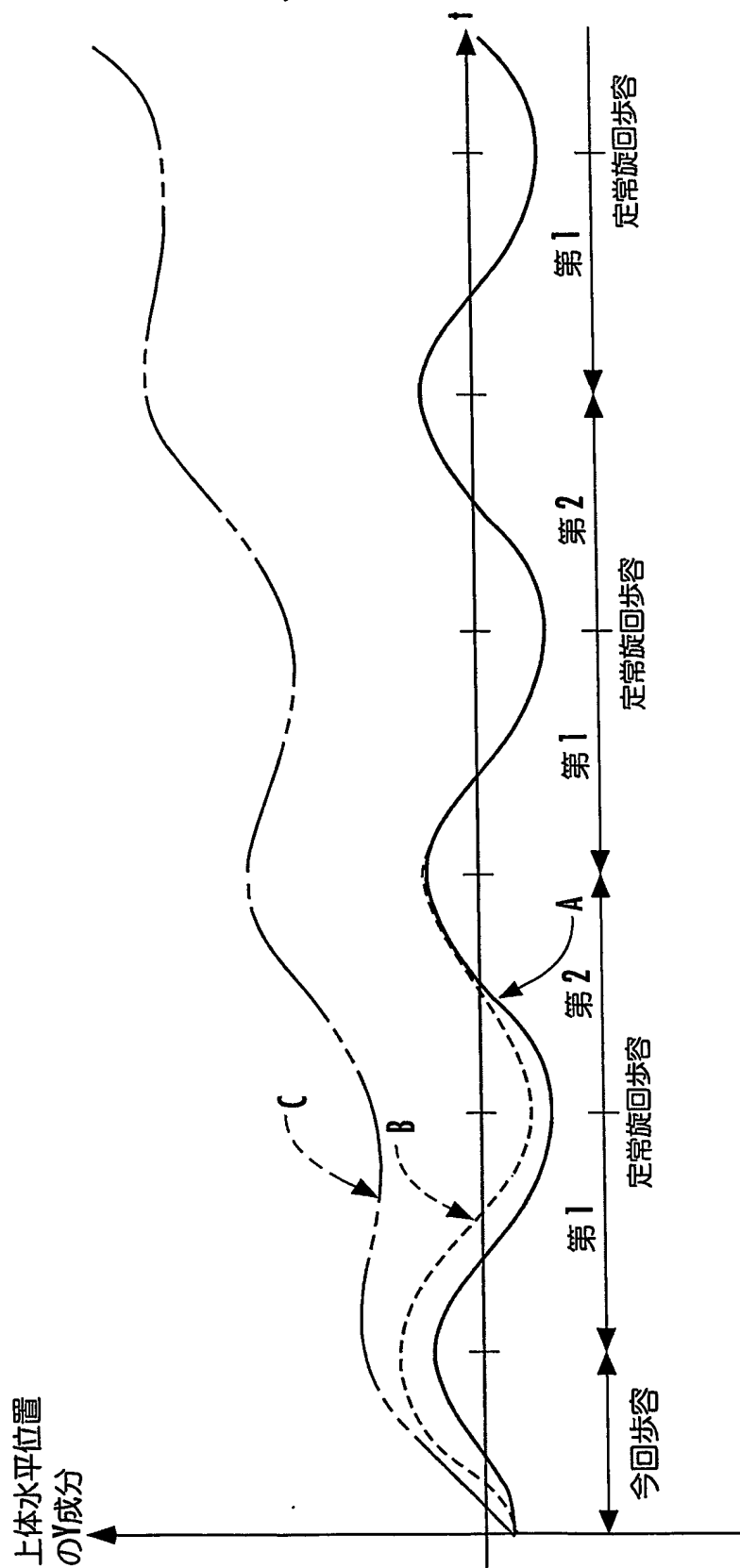
37 / 74

FIG.46



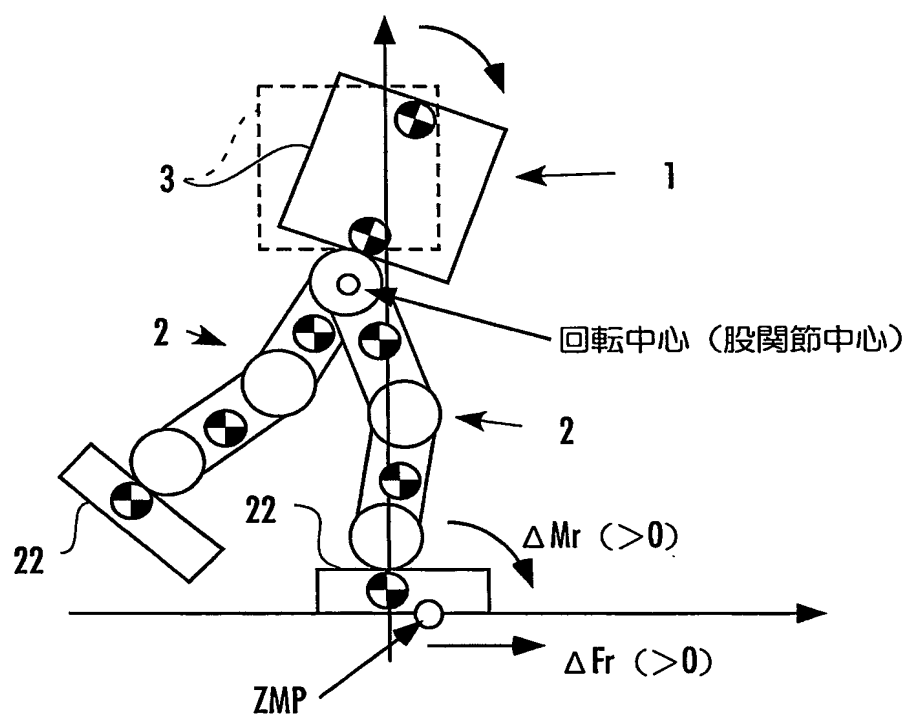
38 / 74

FIG.47



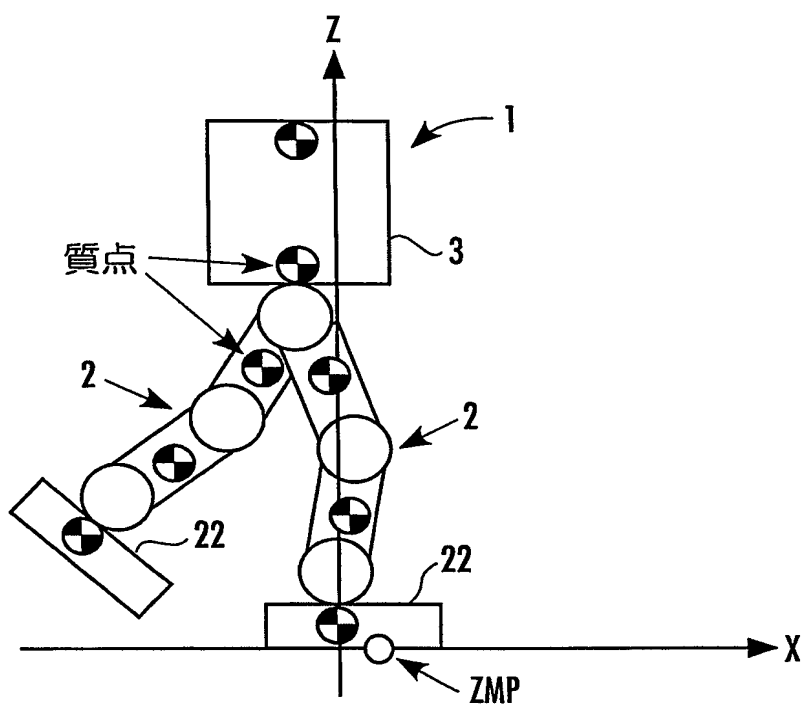
39 / 74

FIG.48



40 / 74

FIG.49



41 / 74

FIG.50

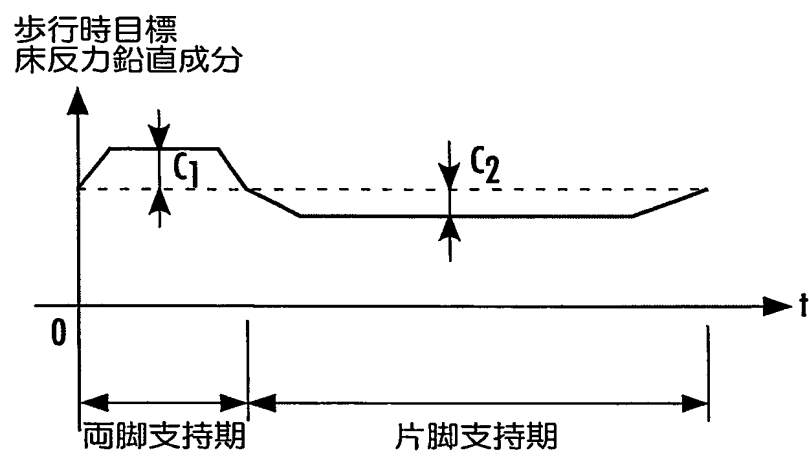
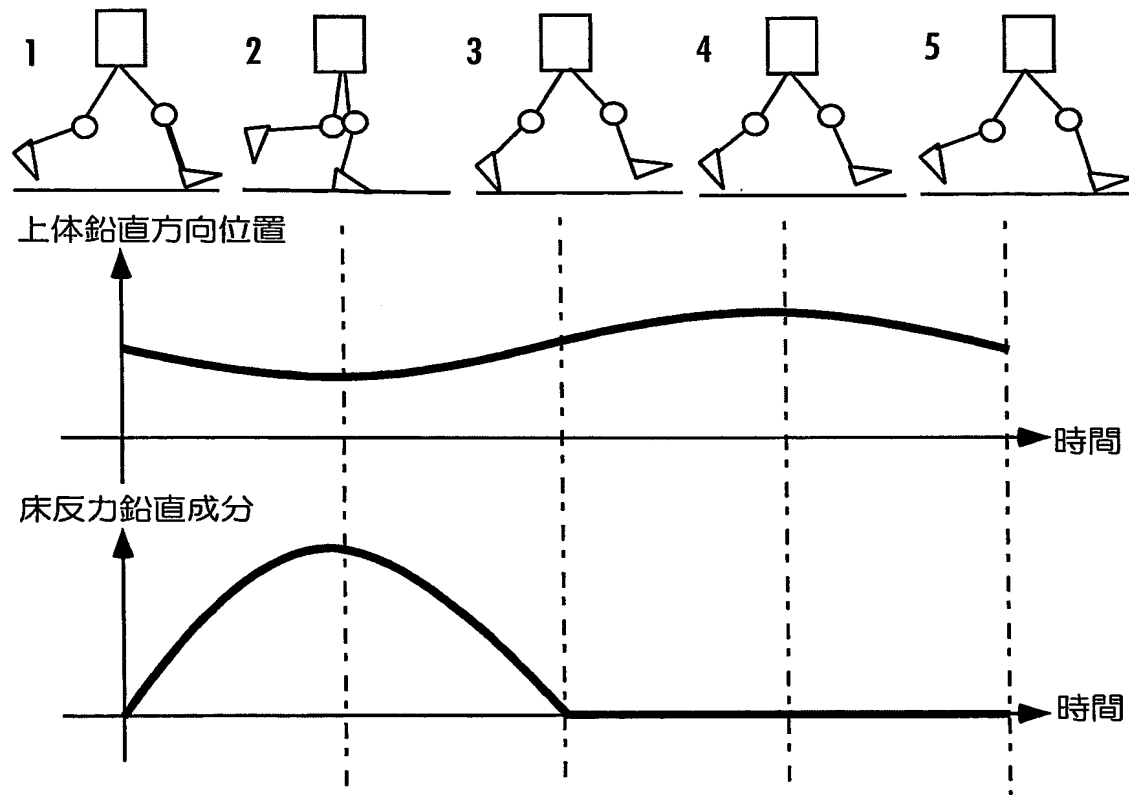


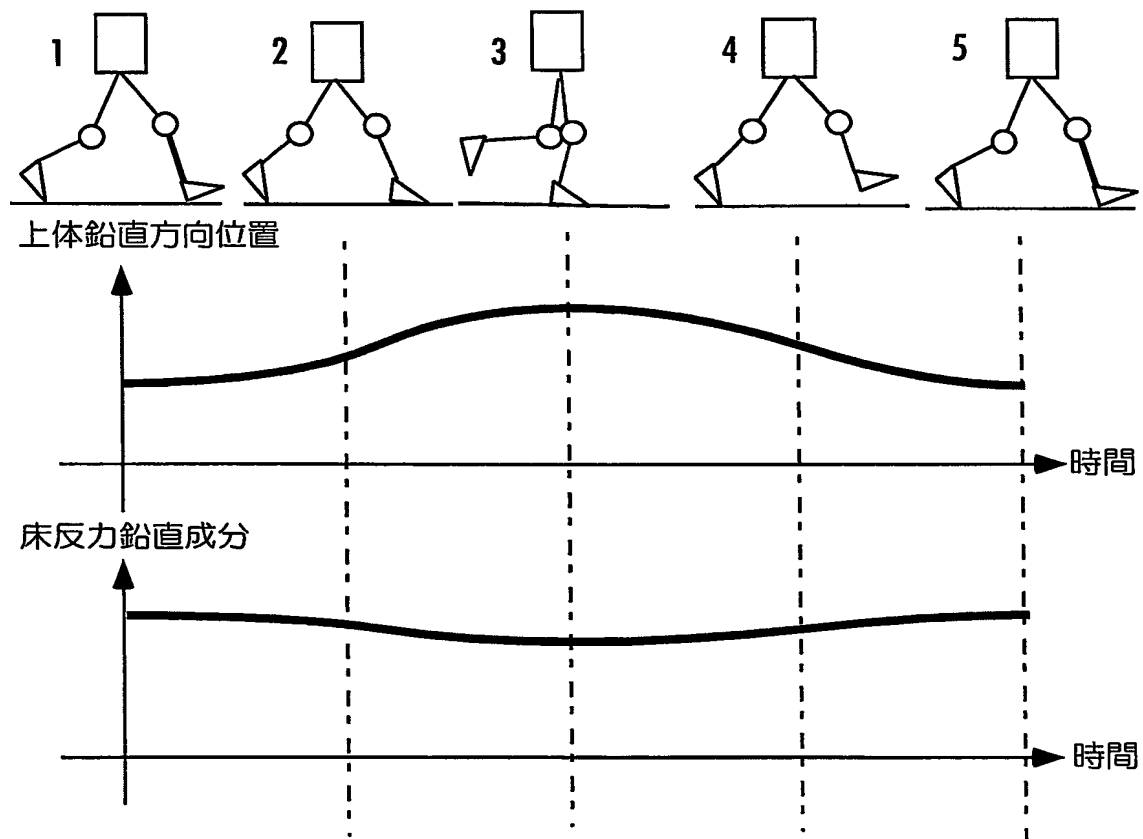


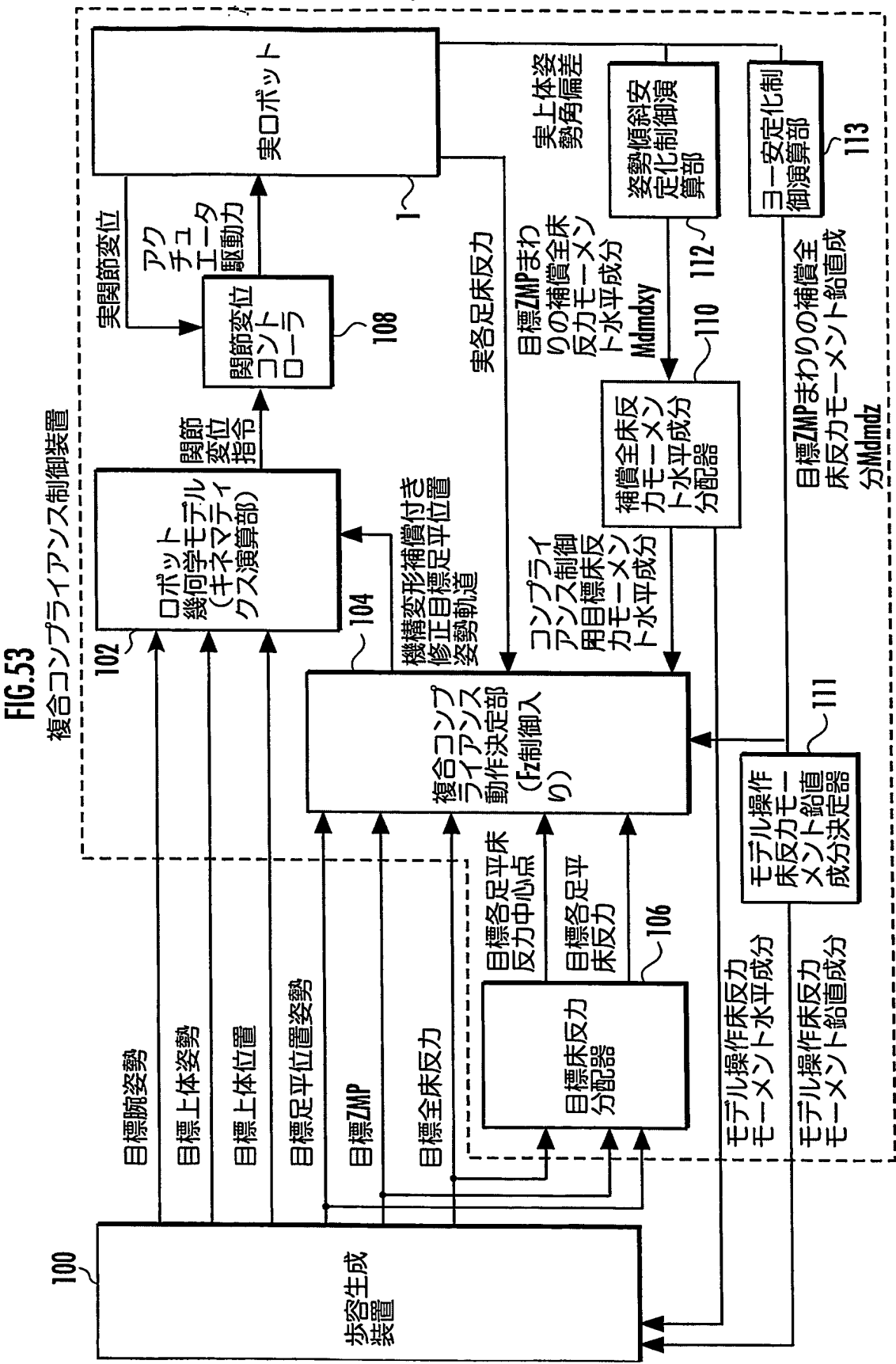
FIG.51



43 / 74

FIG.52





45/74

FIG.54

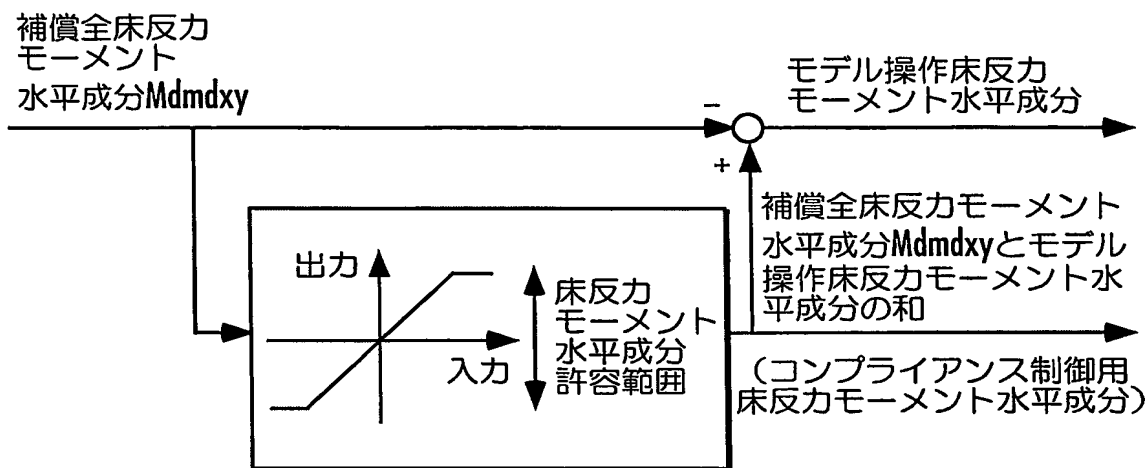
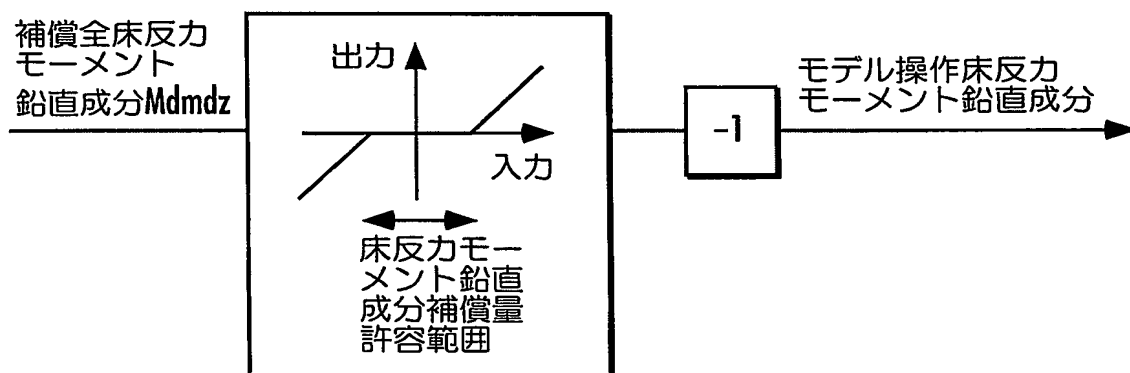
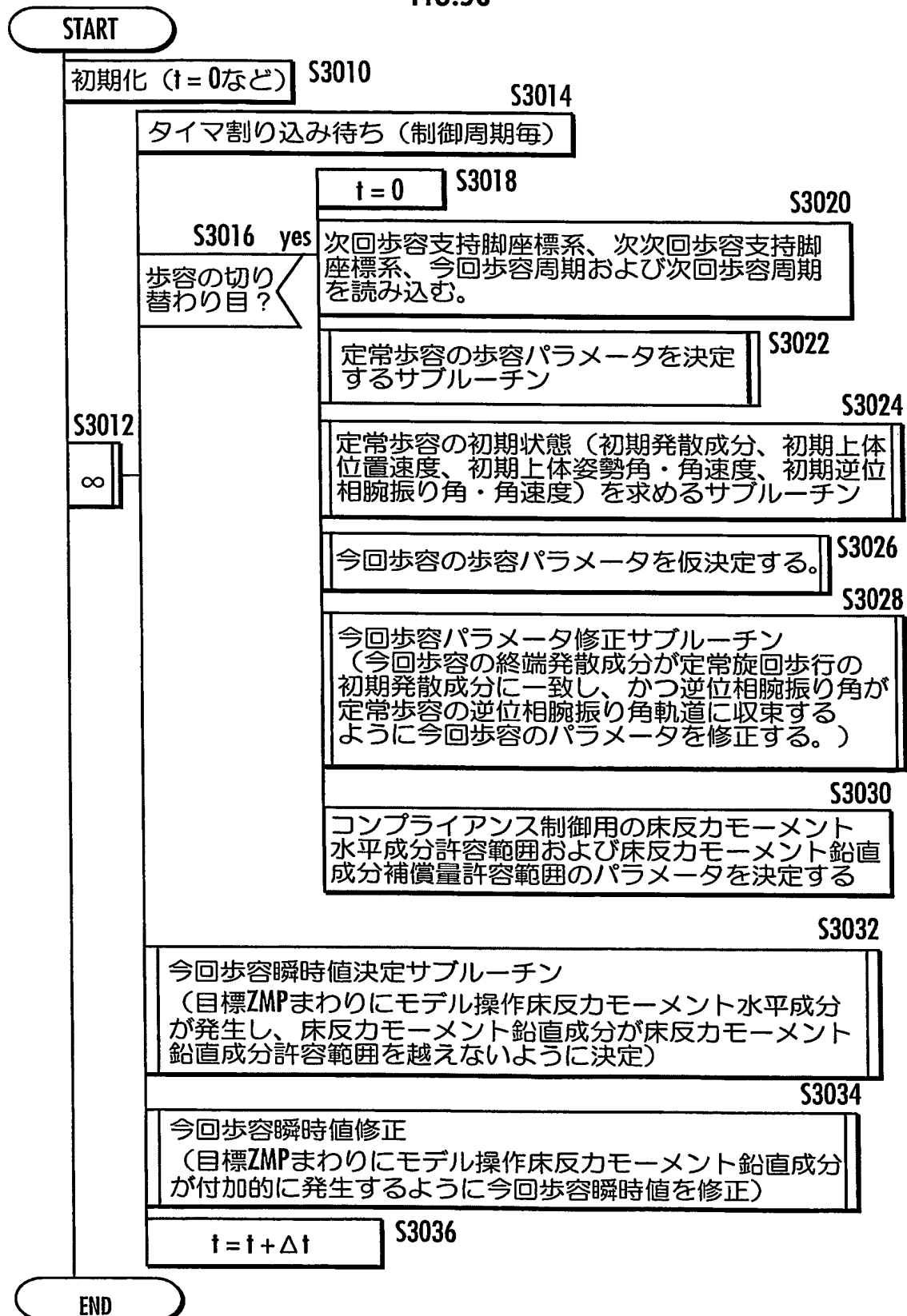


FIG.55



46 / 74

FIG.56



47 / 74

FIG.57

ENTRY

歩容パラメータを基に現在時刻での目標床反力鉛直成分を求める。

S3400

歩容パラメータを基に現在時刻での目標ZMPを求める。

S3402

歩容パラメータを基に現在時刻での目標両足平位置姿勢、基準上体姿勢および基準腕姿勢を求める。

S3404

目標床反力鉛直成分を満足する全体重心鉛直位置速度を算出する。

S3406

全体重心鉛直位置を満足する上体鉛直位置を算出する。

S3408

歩容パラメータを基に現在時刻での床反力水平成分許容範囲[Fxmin,Fxmax]を求める。

S3410

歩容パラメータを基に現在時刻での床反力モーメント鉛直成分許容範囲[Mzmin,Mzmax]を求める。

S3411

歩容パラメータを基に現在時刻での床反力モーメント水平成分許容範囲[Mxymin,Mxymax]と床反力モーメント鉛直成分補償量許容範囲[Mzcmin,Mzcmax]を求める。

S3412

S3414

目標ZMPまわりにモデル操作床反力モーメントが発生し、かつ、床反力水平成分Fxが[Fxmin,Fxmax]を越えず、かつ、上体姿勢角軌道が定常歩容に収束するように、上体水平加速度と上体姿勢角加速度を決定すると共に、床反力モーメント鉛直成分Mzが[Mzmin,Mzmax]を越えず、かつ、逆位相腕振り角軌道が定常歩容に収束するように、逆位相腕振り角加速度を決定する。

上体水平加速度と上体姿勢角加速度を積分して上体水平速度と上体姿勢角速度を算出する。これをさらに積分して、上体水平位置と上体姿勢を決定する。

S3416

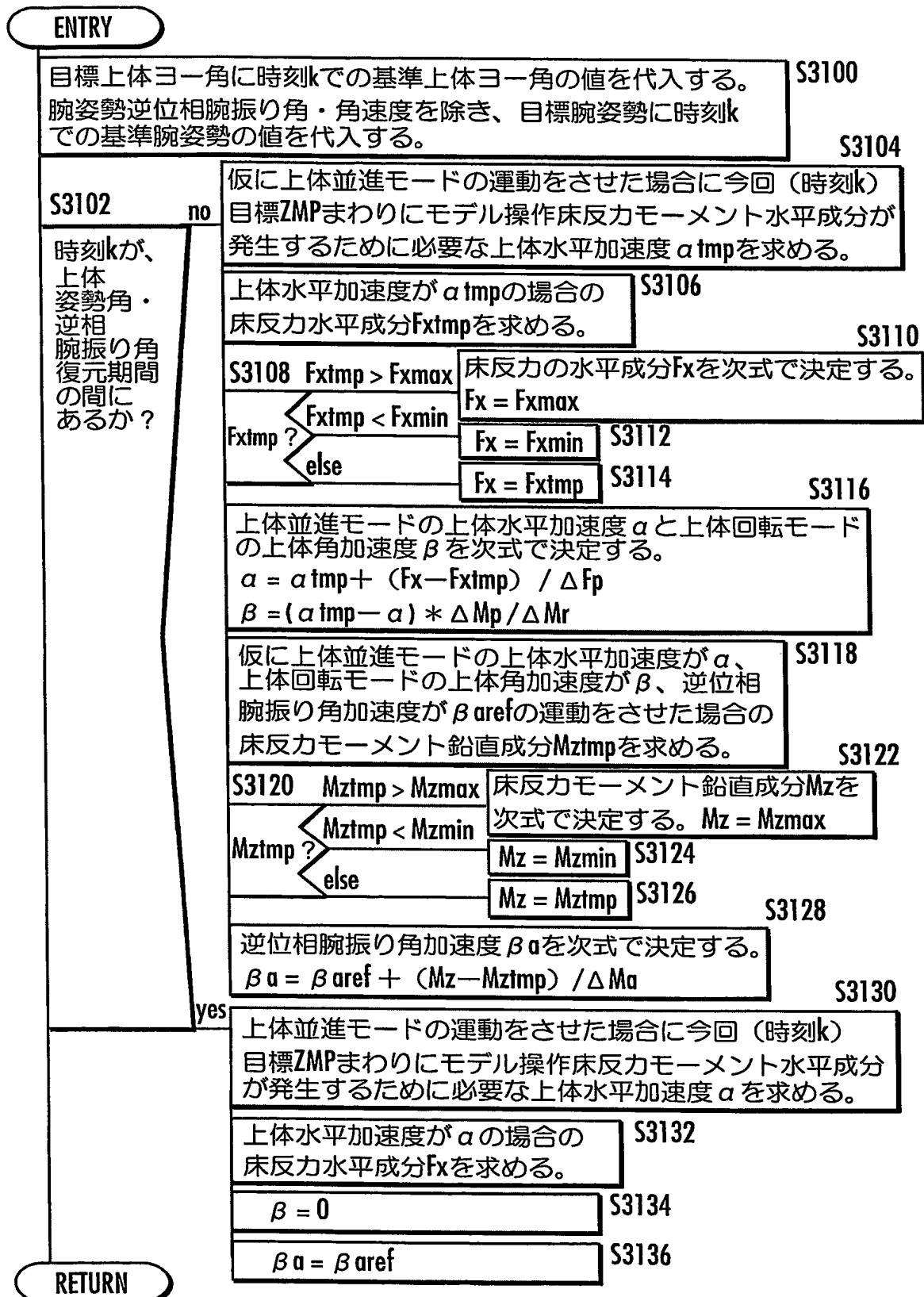
逆位相腕振り加速度を積分して逆位相腕振り角速度を算出する。これをさらに積分して、逆位相腕振り角を決定する。

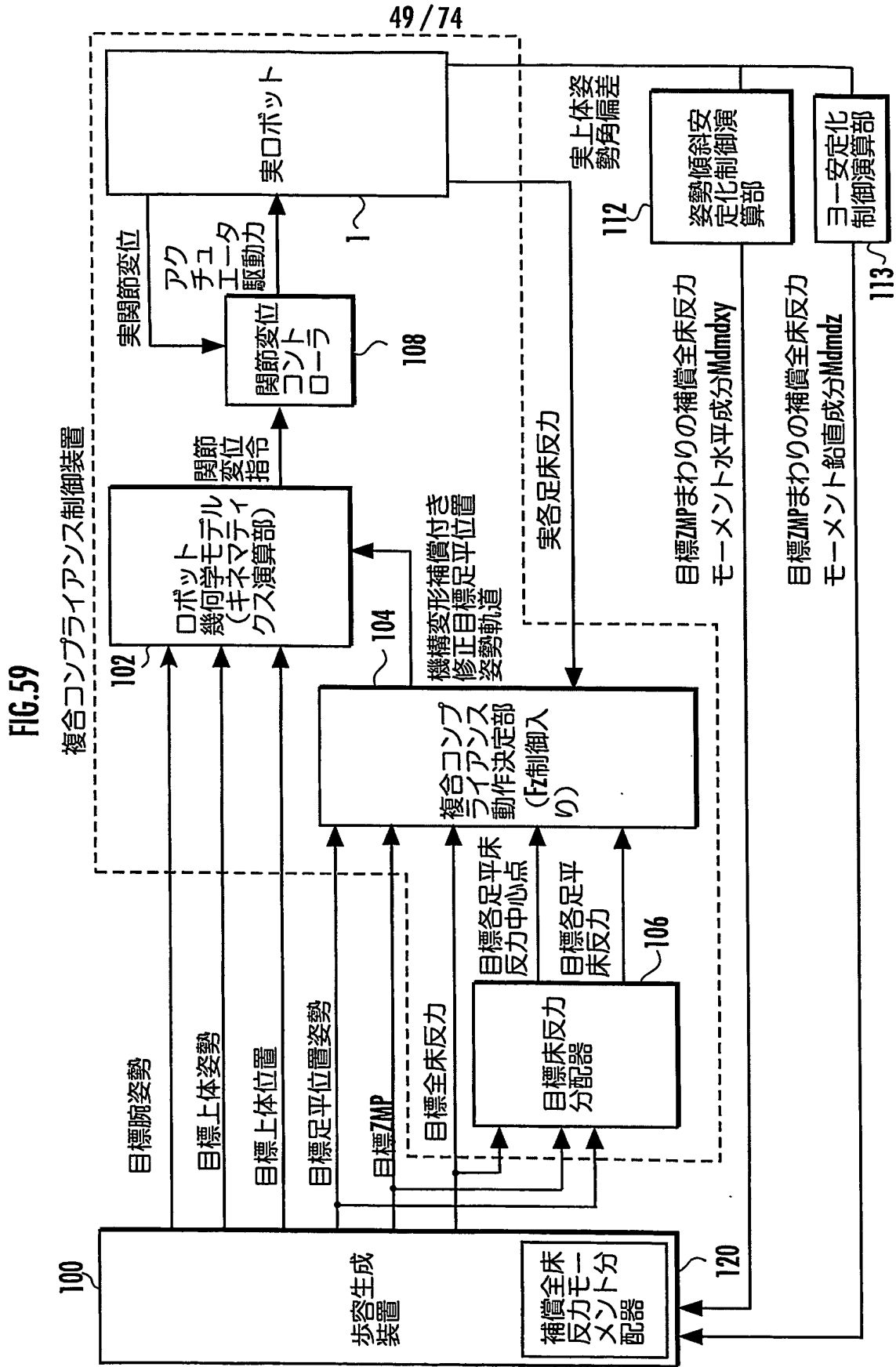
S3418

RETURN

48 / 74

FIG.58

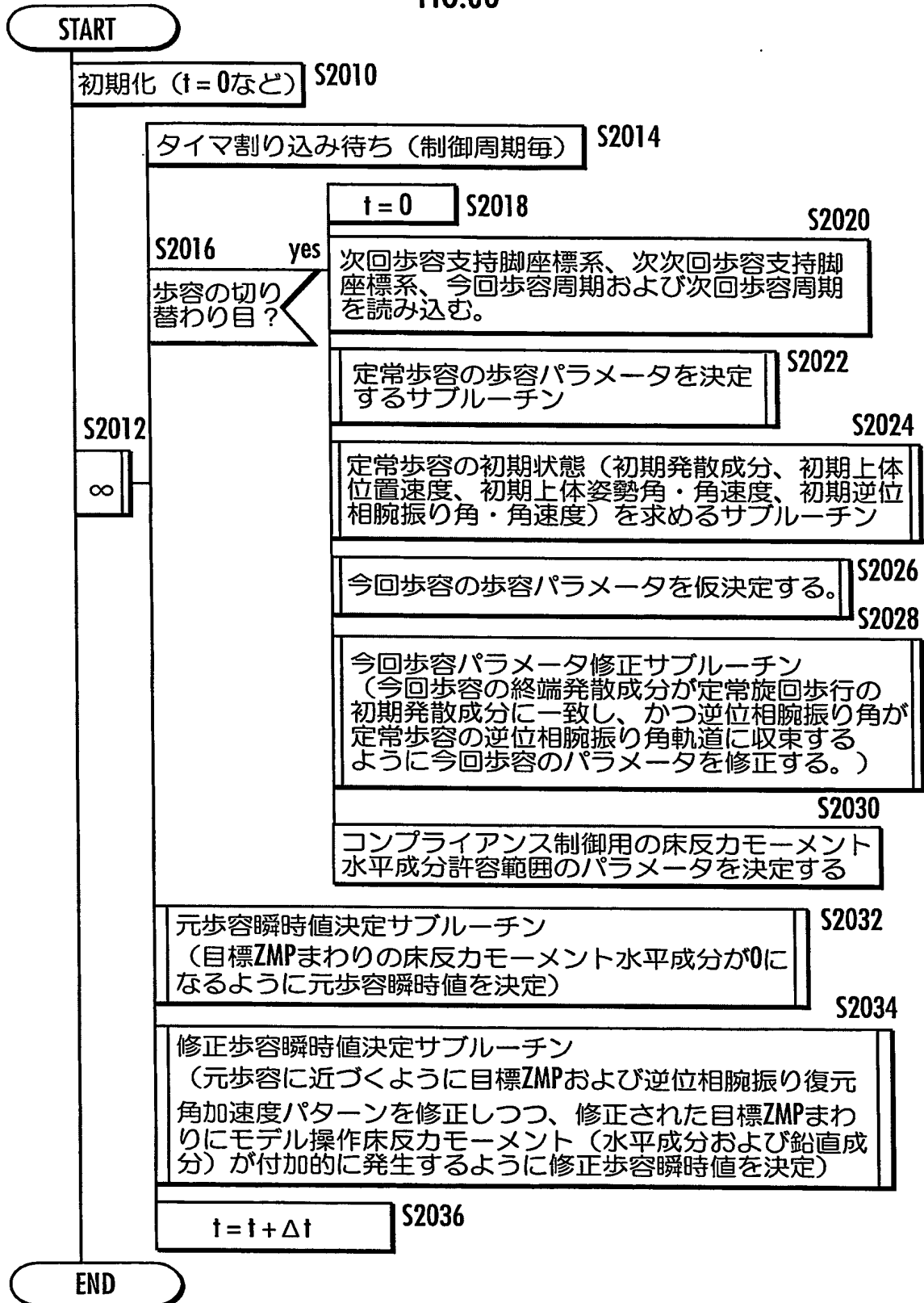






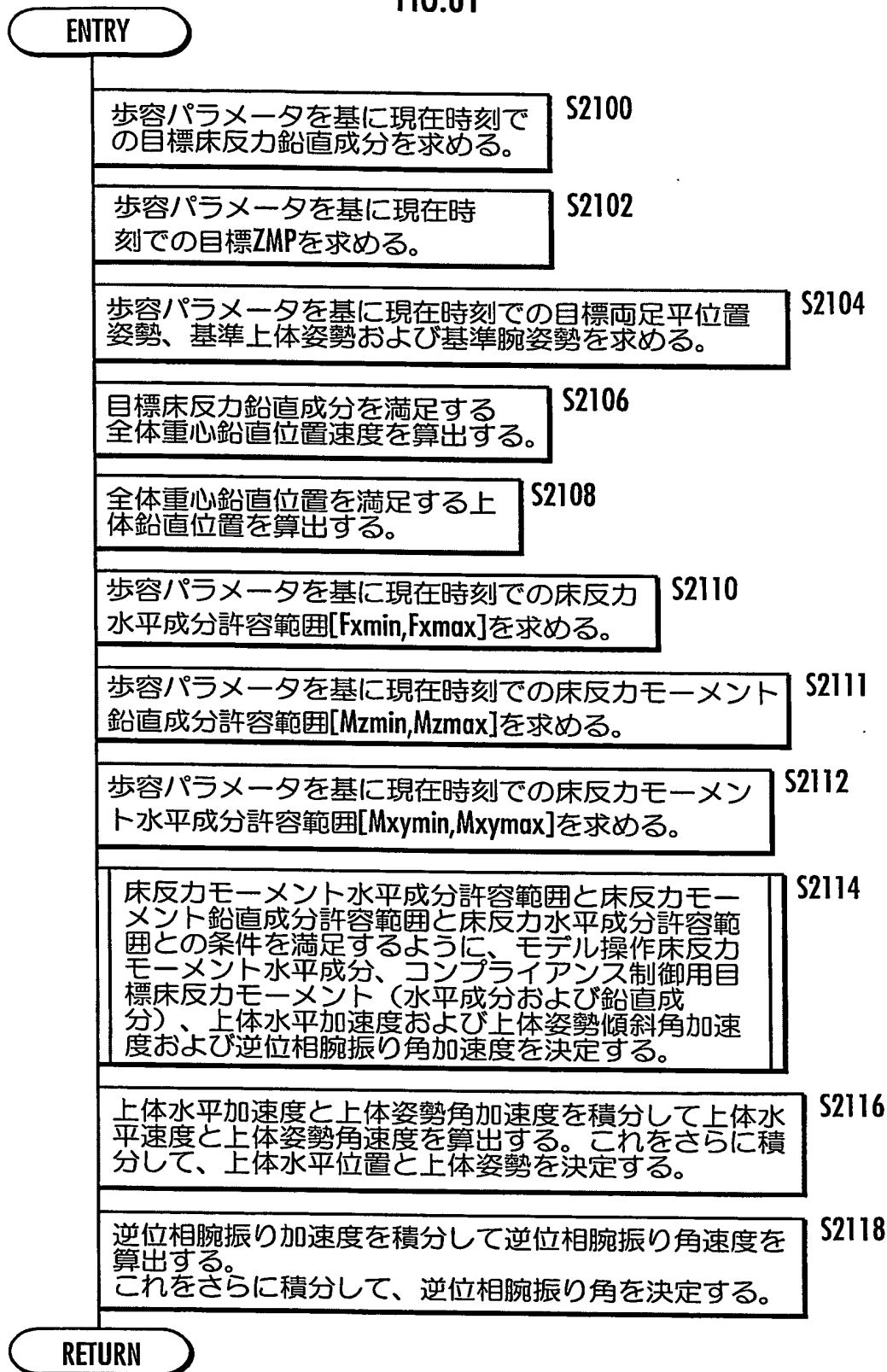
50 / 74

FIG.60



51 / 74

FIG.61



52 / 74

FIG.62

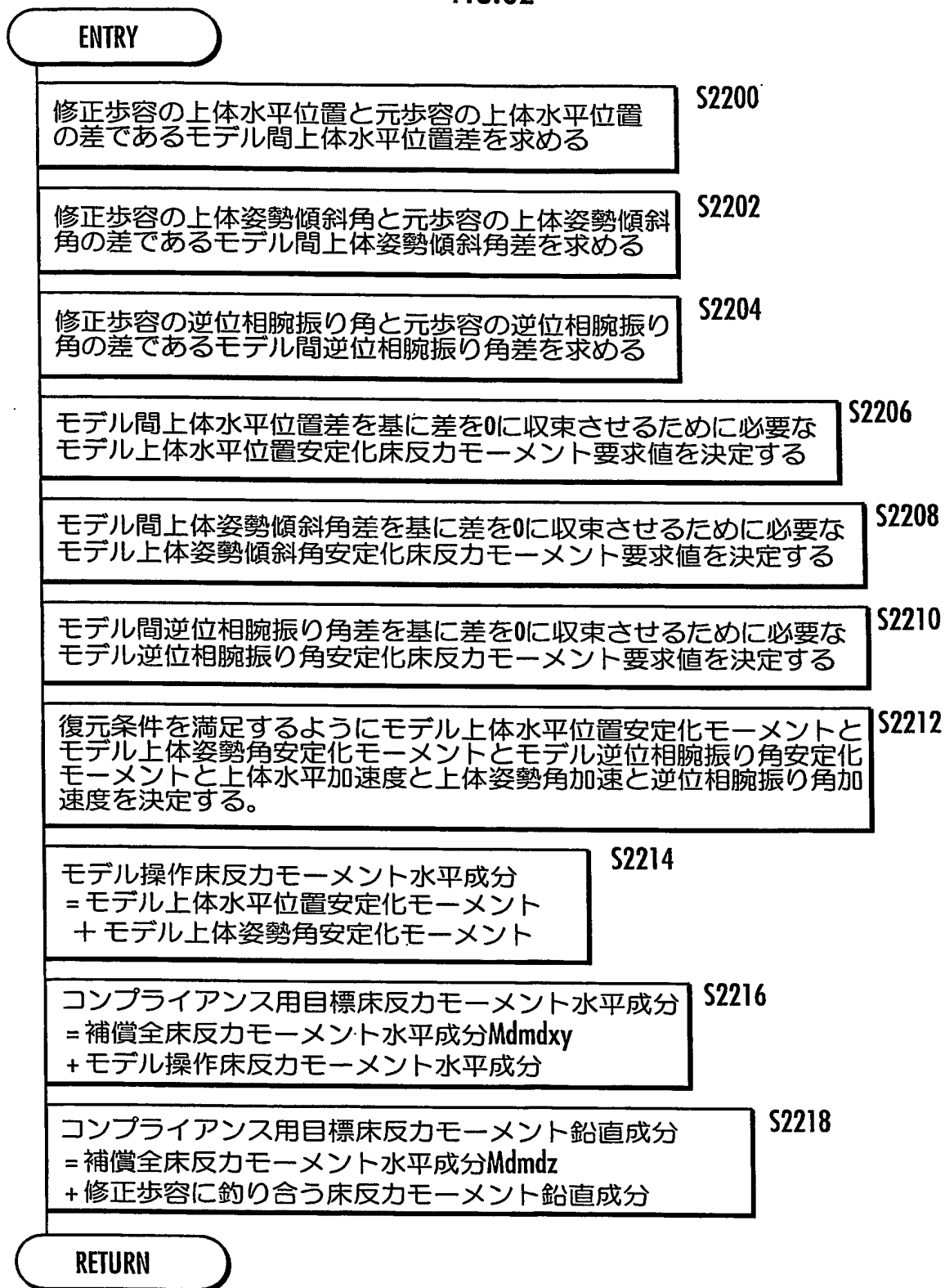
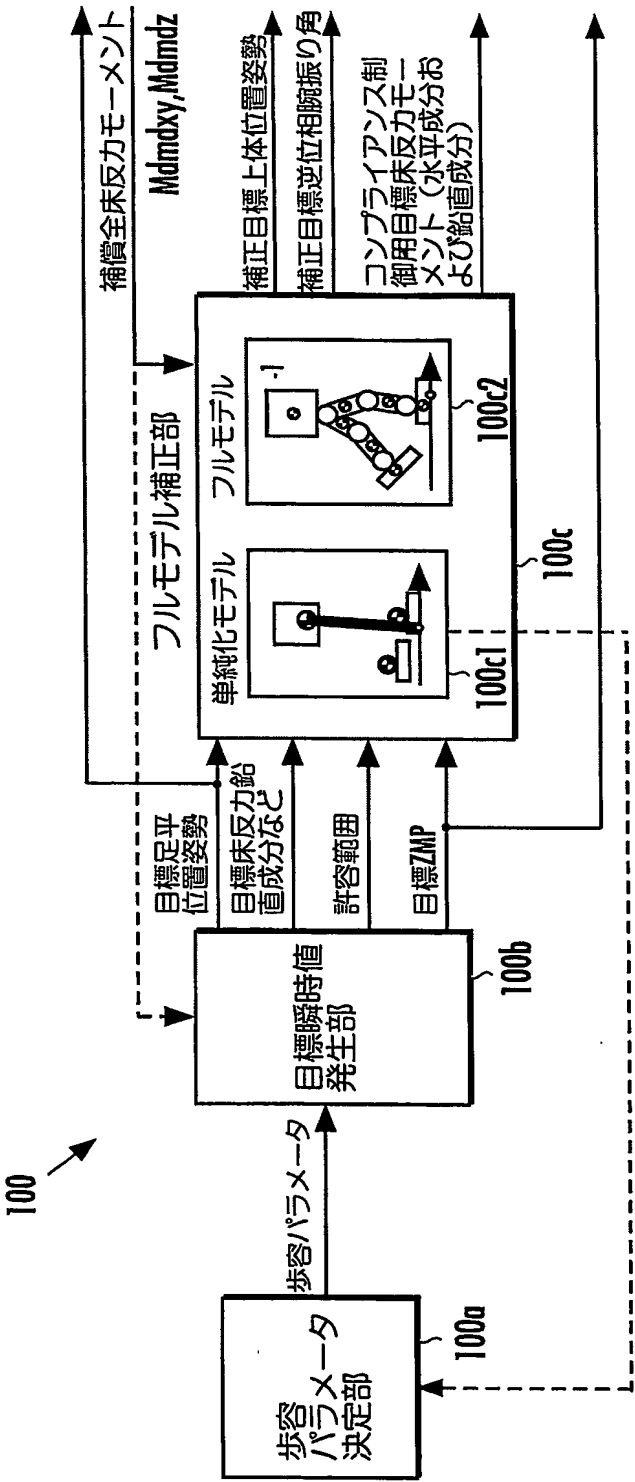
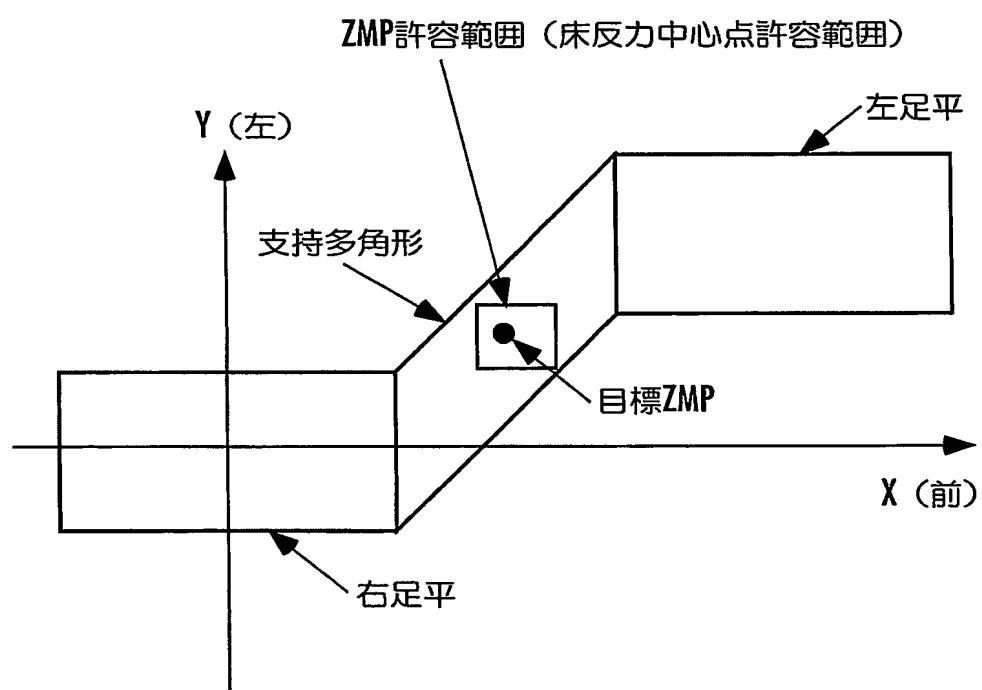


FIG.63



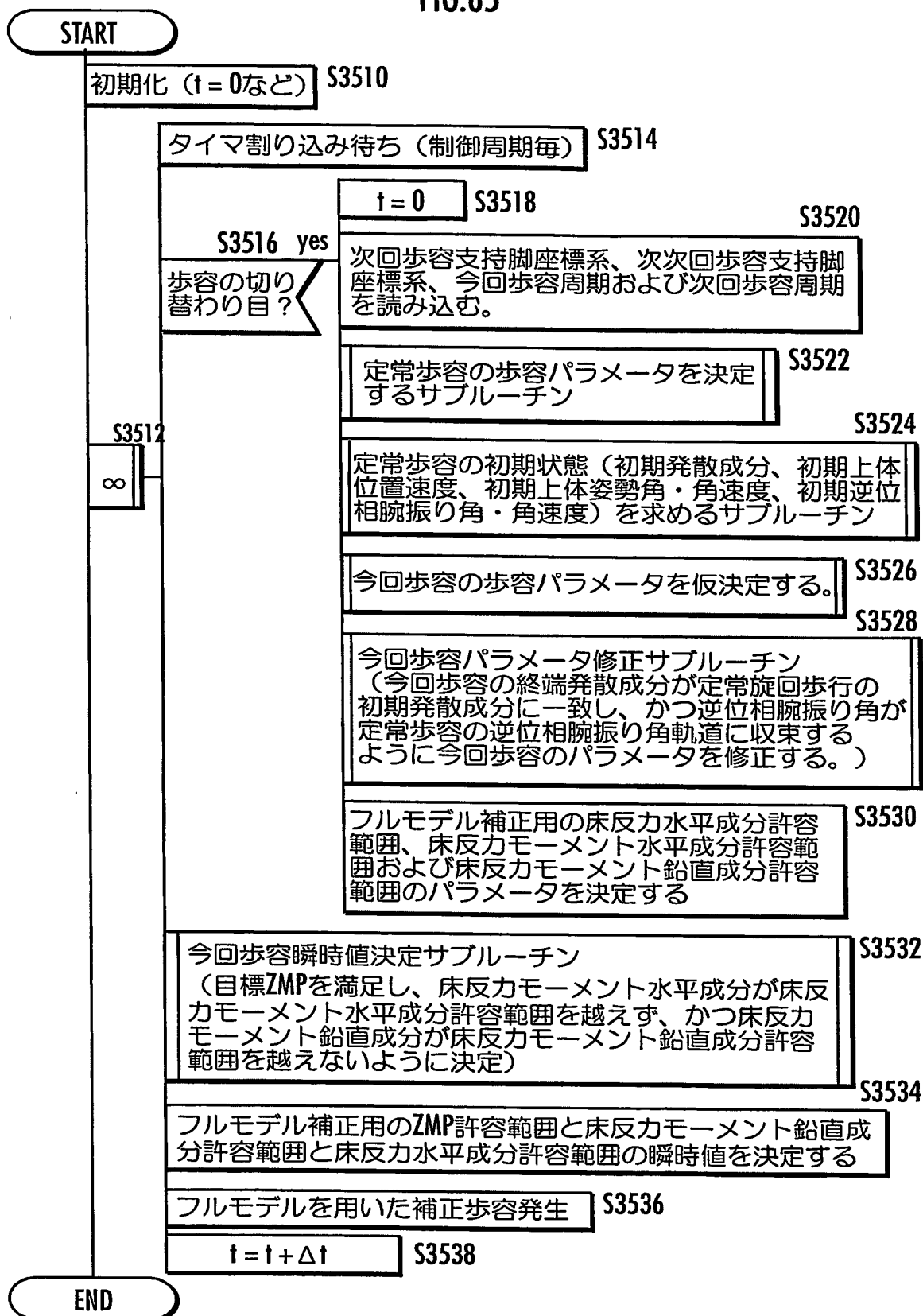
54 / 74

FIG.64

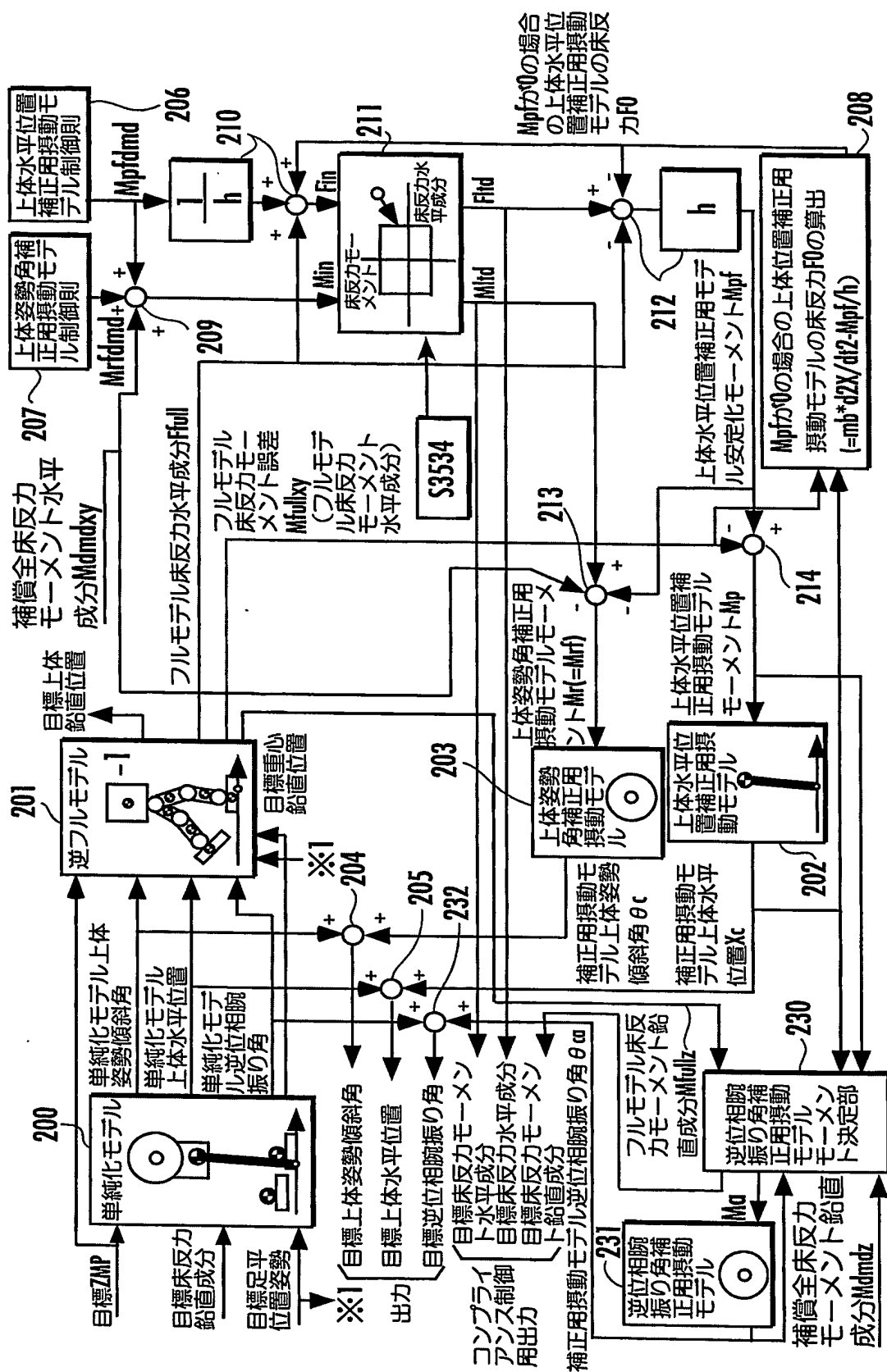


55 / 74

FIG.65



**FIG. 66**



57 / 74

FIG.67

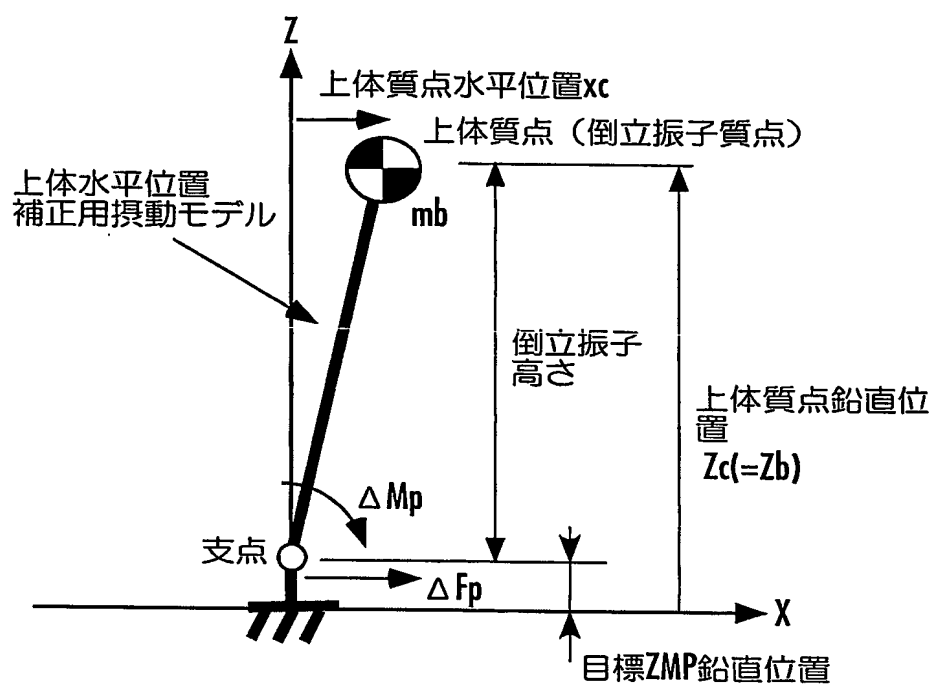
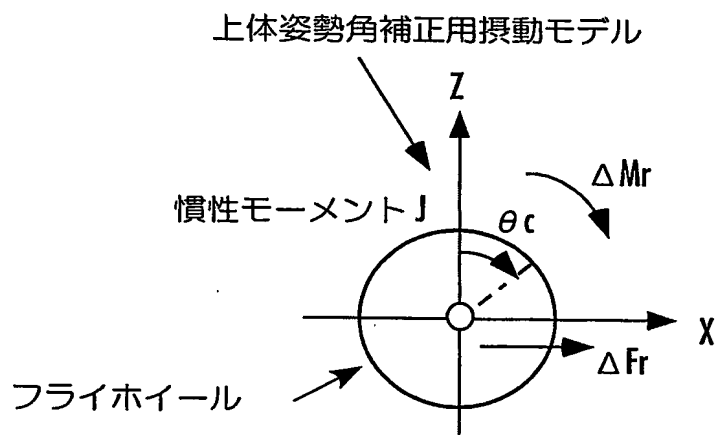


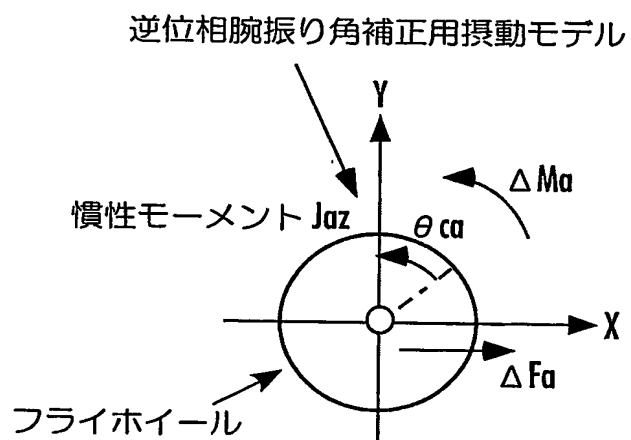
FIG.68



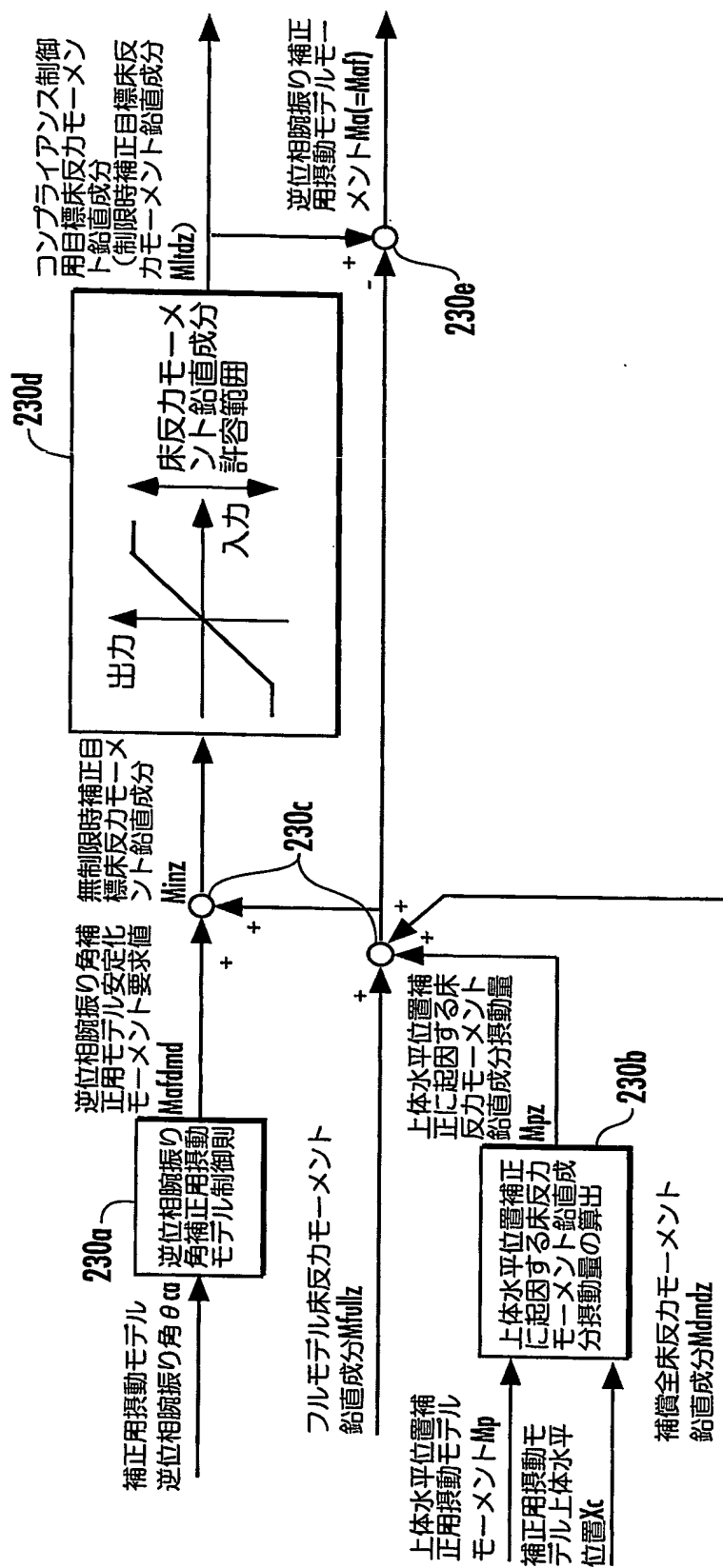


58 / 74

FIG.69



**FIG.70**



**FIG. 71**

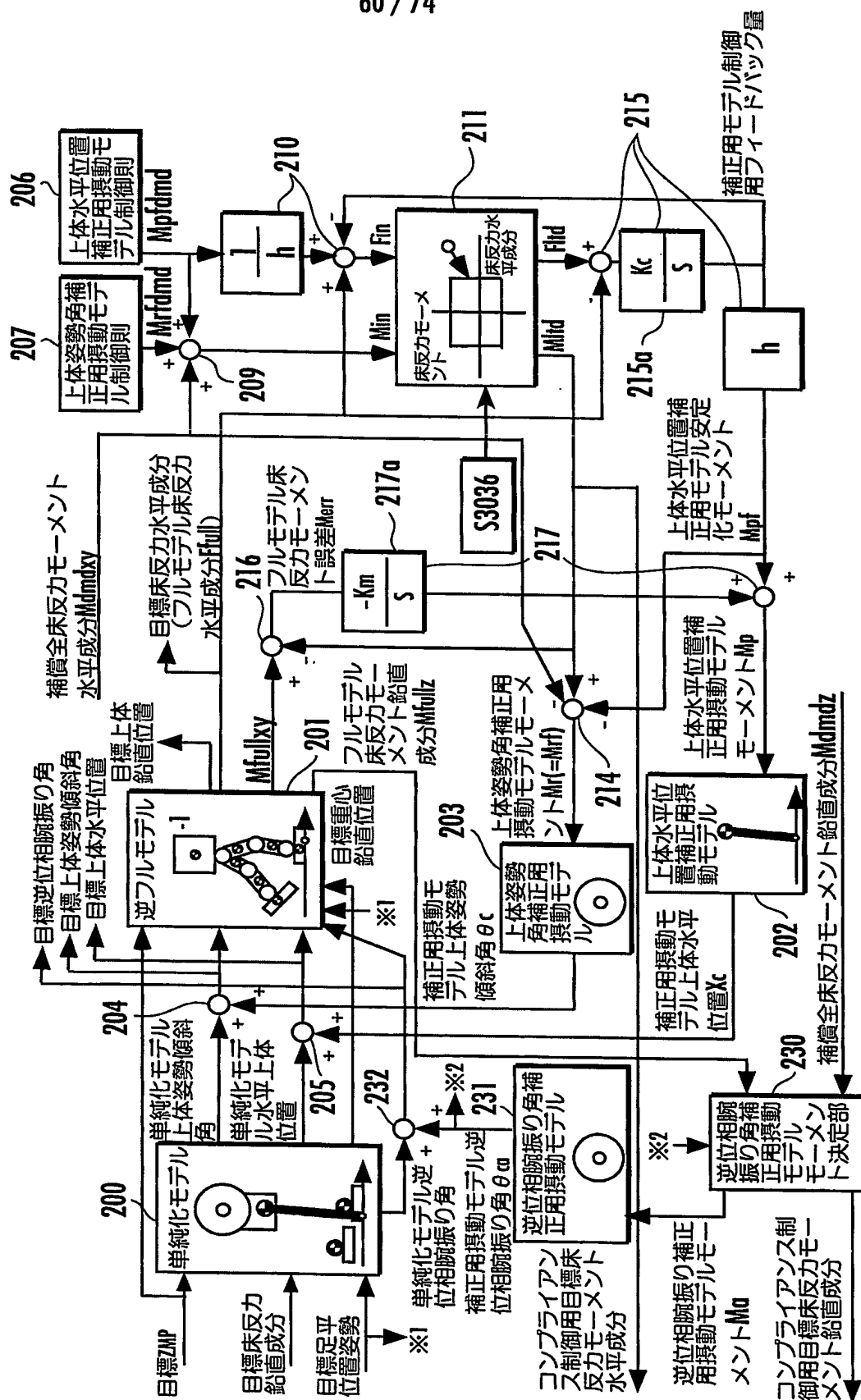


FIG.72

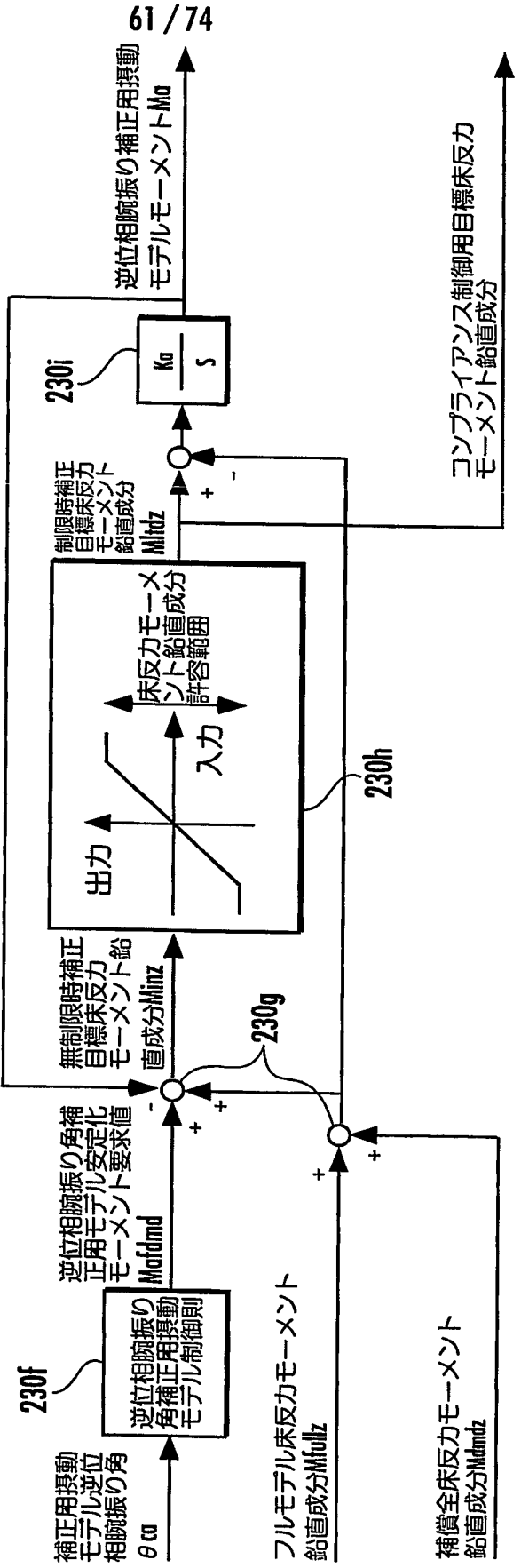
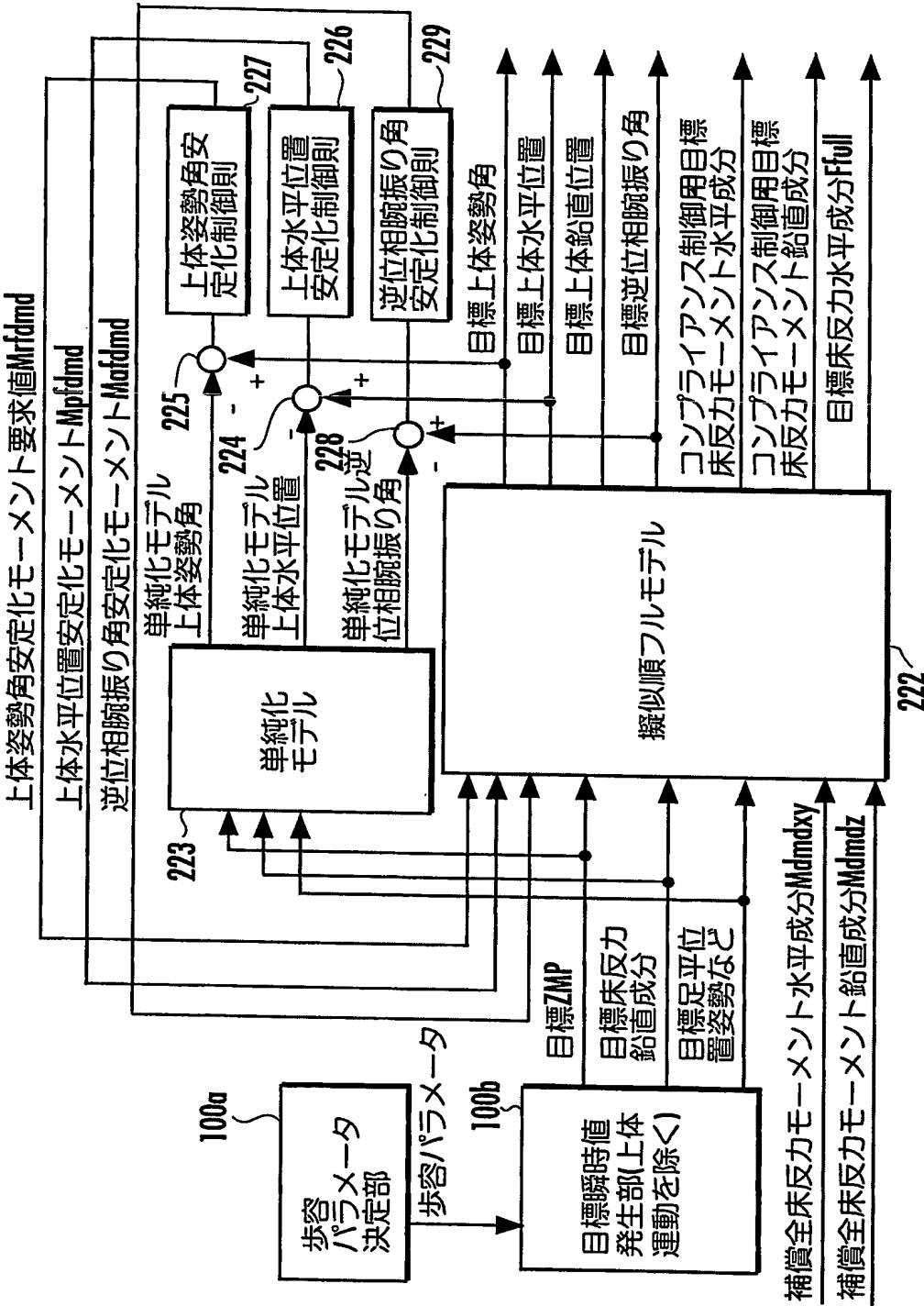
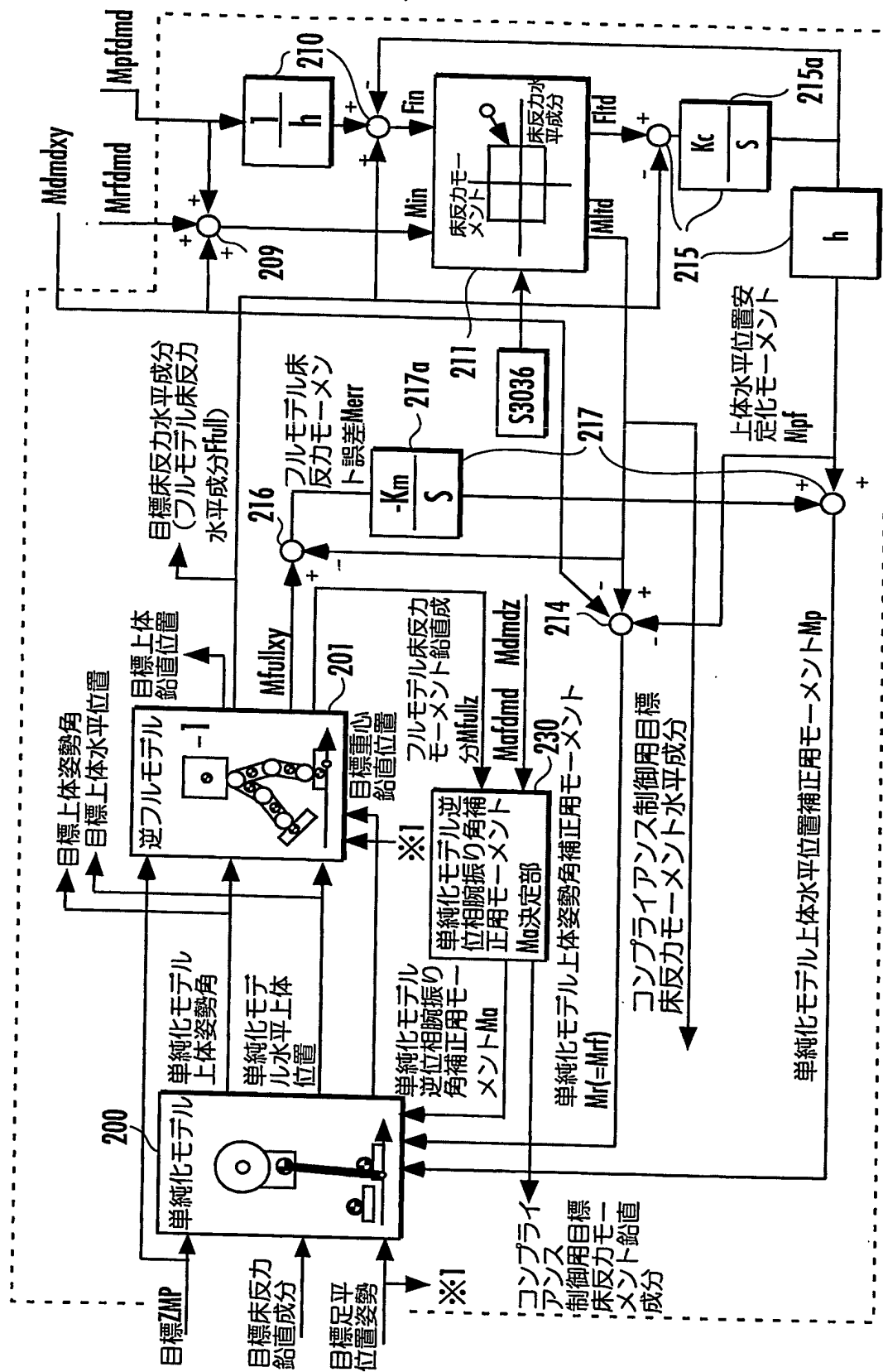


FIG.73



**FIG. 74**



**FIG. 75**

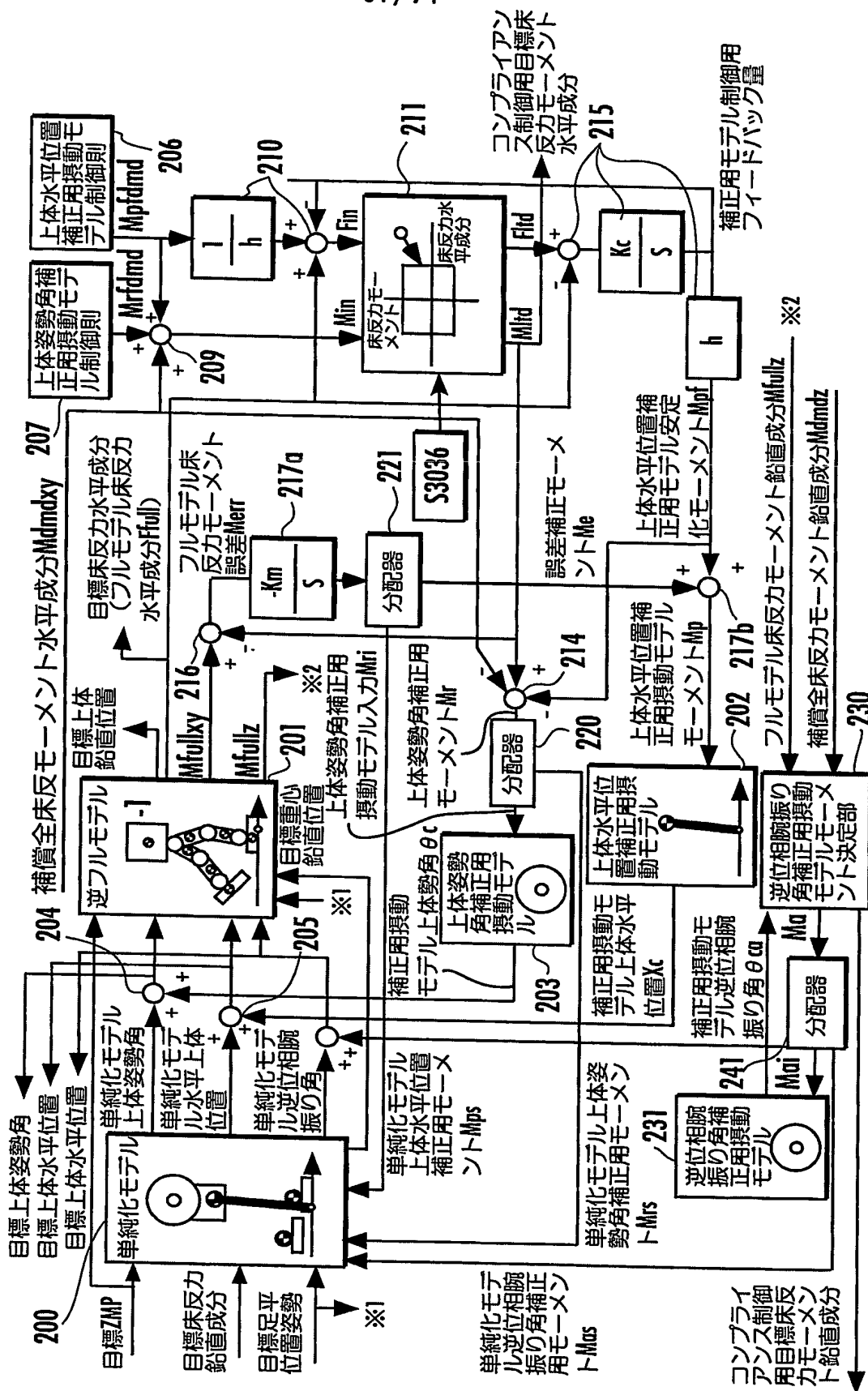
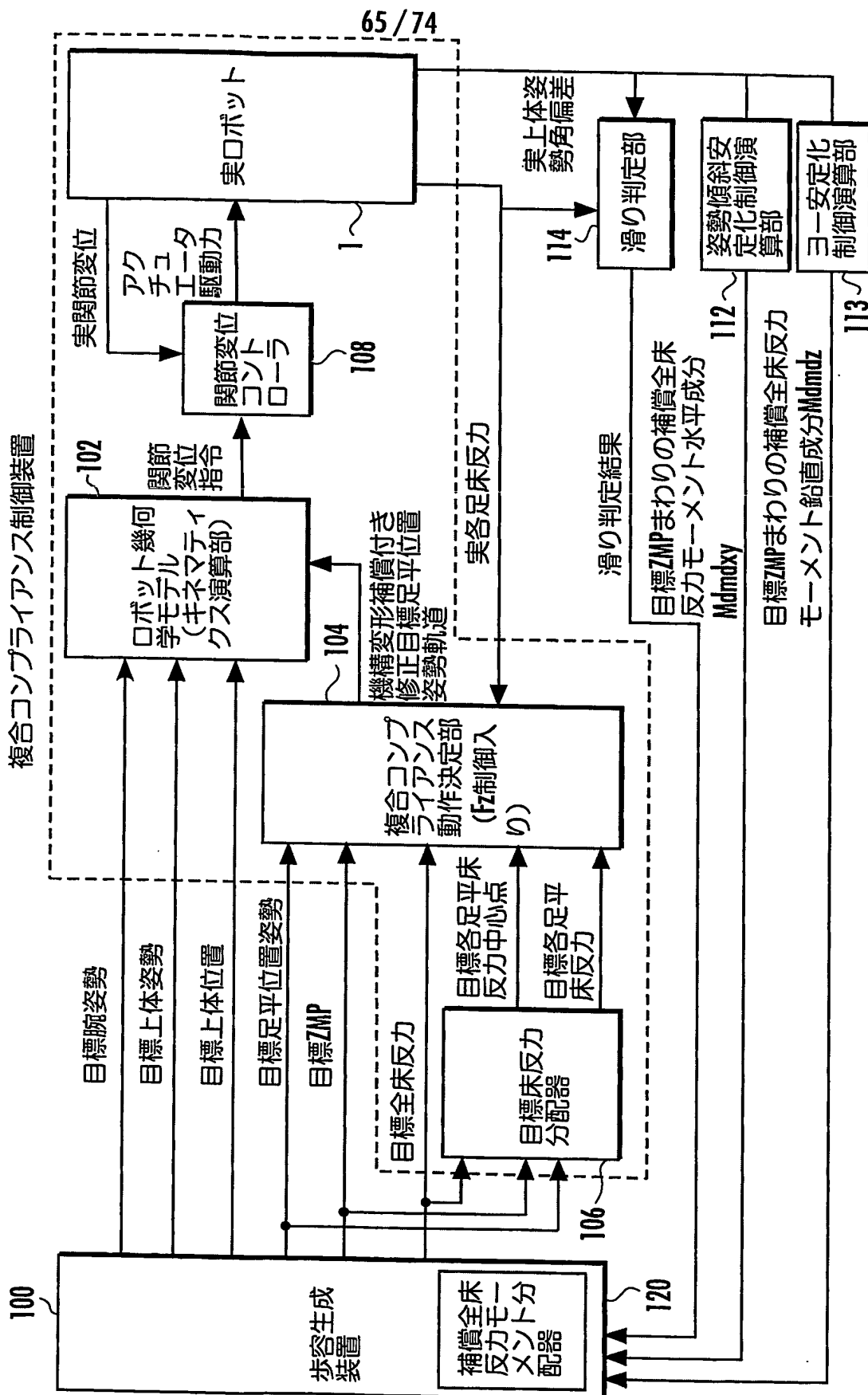


FIG.76

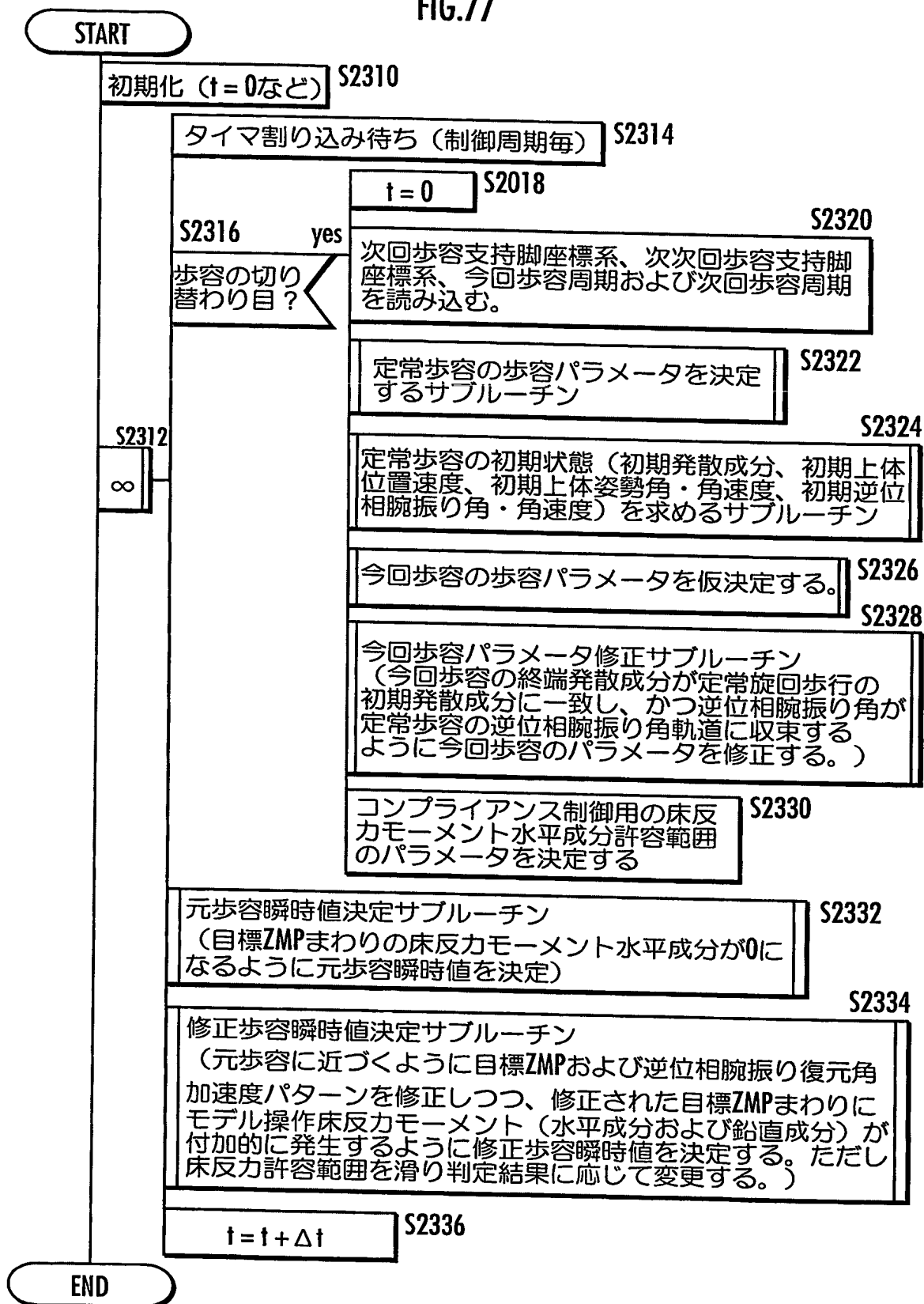
複合コンプライアンス制御装置



65/74



66 / 74  
FIG.77



67 / 74  
FIG.78

ENTRY

歩容パラメータを基に現在時刻での  
目標床反力鉛直成分を求める。 S5100

歩容パラメータを基に現在時  
刻での目標ZMPを求める。 S5102

歩容パラメータを基に現在時刻での目標両足平位置  
姿勢、基準上体姿勢および基準腕姿勢を求める。 S5104

目標床反力鉛直成分を満足する  
全体重心鉛直位置速度を算出する。 S5106

全体重心鉛直位置を満足する上  
体鉛直位置を算出する。 S5108

歩容パラメータを基に現在時刻での床反力  
水平成分許容範囲[ $F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ]を求める。 S5110

歩容パラメータを基に現在時刻での床反力  
モーメント鉛直成分許容範囲[ $M_{zmin}$ ,  $M_{zmax}$ ]を求める。 S5112

歩容パラメータを基に現在時刻での床反力モーメン  
ト水平成分許容範囲[ $M_{xymin}$ ,  $M_{xymax}$ ]を求める。 S5114

S5116 yes S5118

滑り判定結果  
=滑りあり? 許容範囲低減率 $\alpha$ を徐々に0に近づける。 S5118

no S5120

許容範囲低減率 $\alpha$ を徐々に1に近づける。 S5120

$F_{xmin}$ ,  $F_{xmax}$ ,  $M_{zmin}$ , および  $M_{zmax}$  に低減率 $\alpha$ を乗じ  
ることにより、床反力水平成分許容範囲と床反  
力モーメント水平成分許容範囲を狭める。 S5122

床反力モーメント水平成分許容範囲と床反力モーメント鉛  
直成分許容範囲と床反力水平成分許容範囲との条件を満足  
するように、モデル操作床反力モーメント水平成分、コン  
プライアンス制御用目標床反力モーメント（水平成分およ  
び鉛直成分）、上体水平加速度および上体姿勢傾斜角加速  
度および逆位相腕振り角加速度を決定する。 S5124

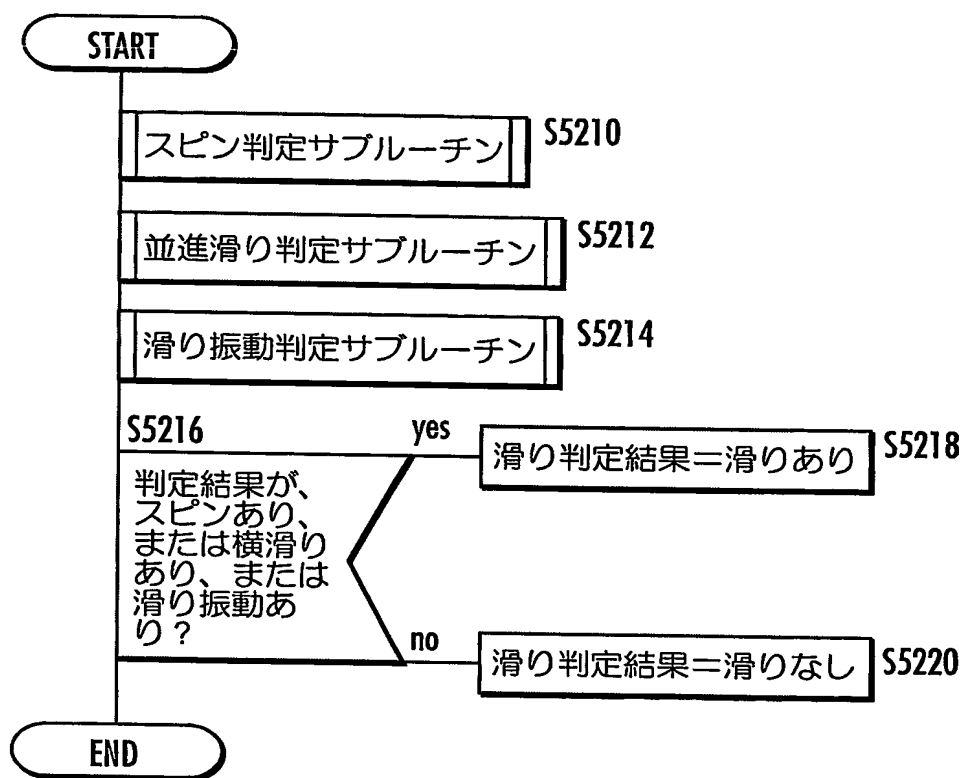
上体水平加速度と上体姿勢角加速度を積分して上体水  
平速度と上体姿勢角速度を算出する。これをさらに積  
分して、上体水平位置と上体姿勢を決定する。 S5126

逆位相腕振り加速度を積分して上体水平速度と逆位相  
腕振り角速度を算出する。これをさらに積分して、逆  
位相腕振り角を決定する。 S5128

RETURN

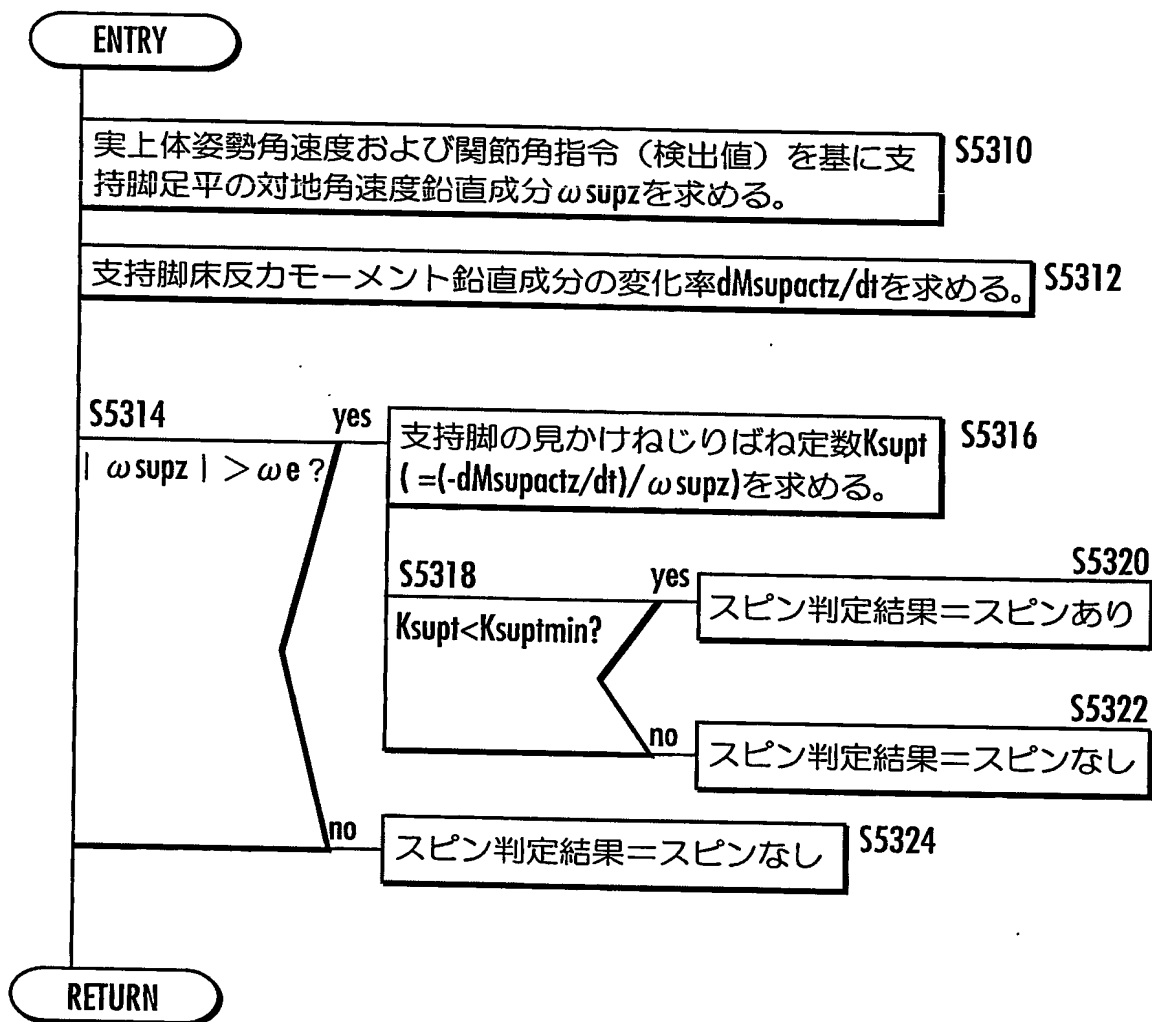
68 / 74

FIG.79



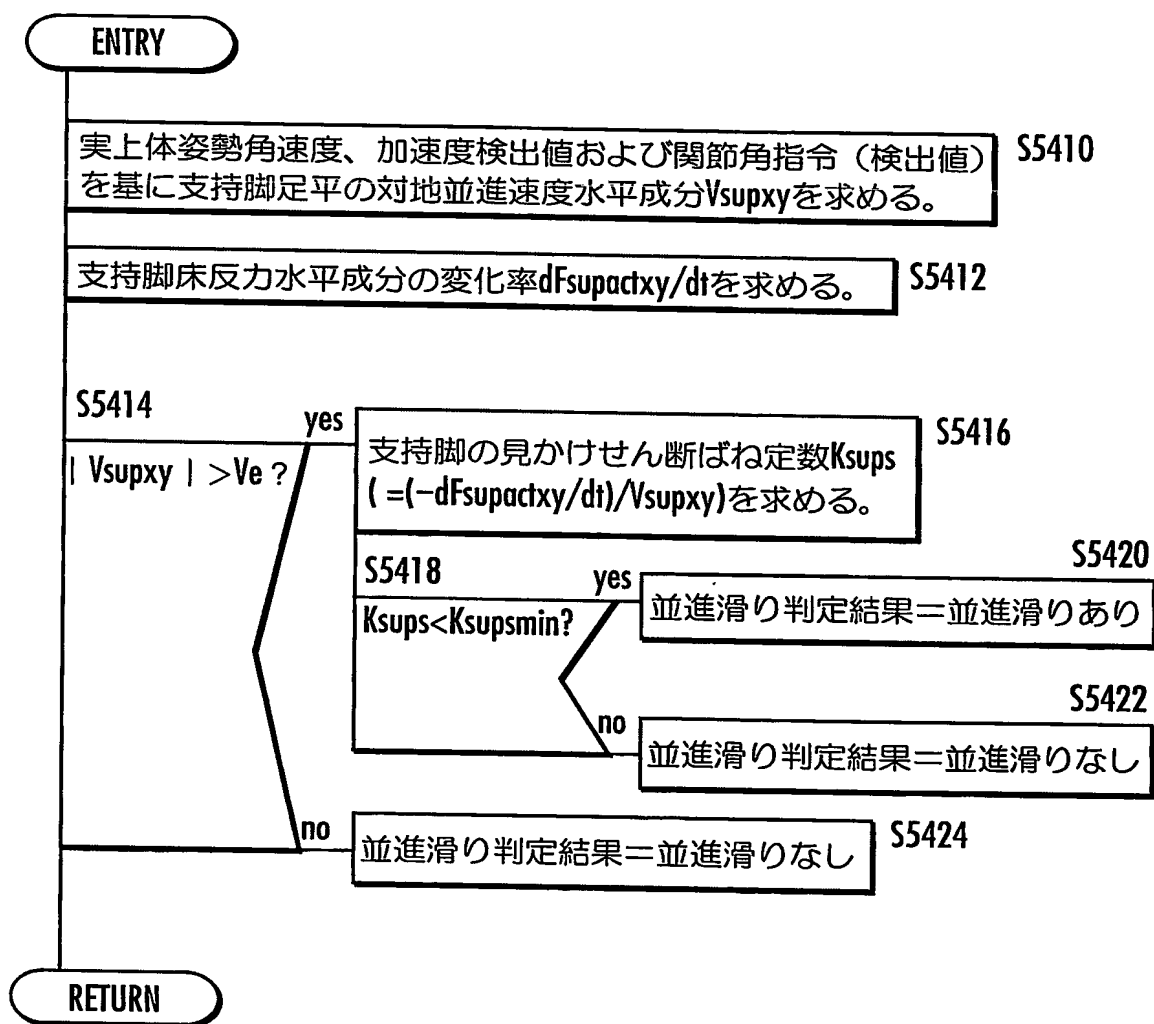
69 / 74

FIG.80



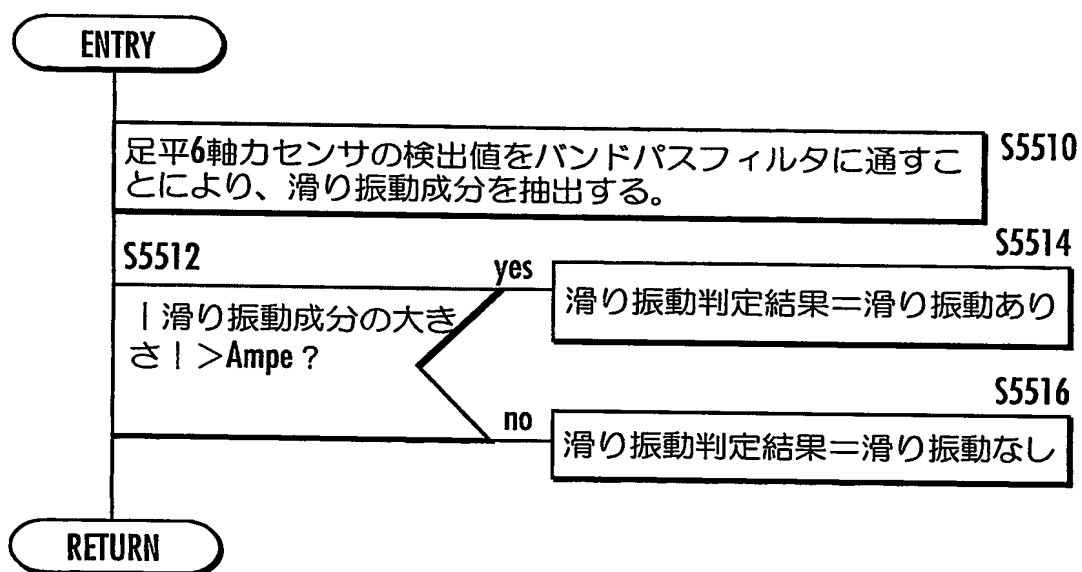
70 / 74

FIG.81



71 / 74

FIG.82



72/74

FIG.83

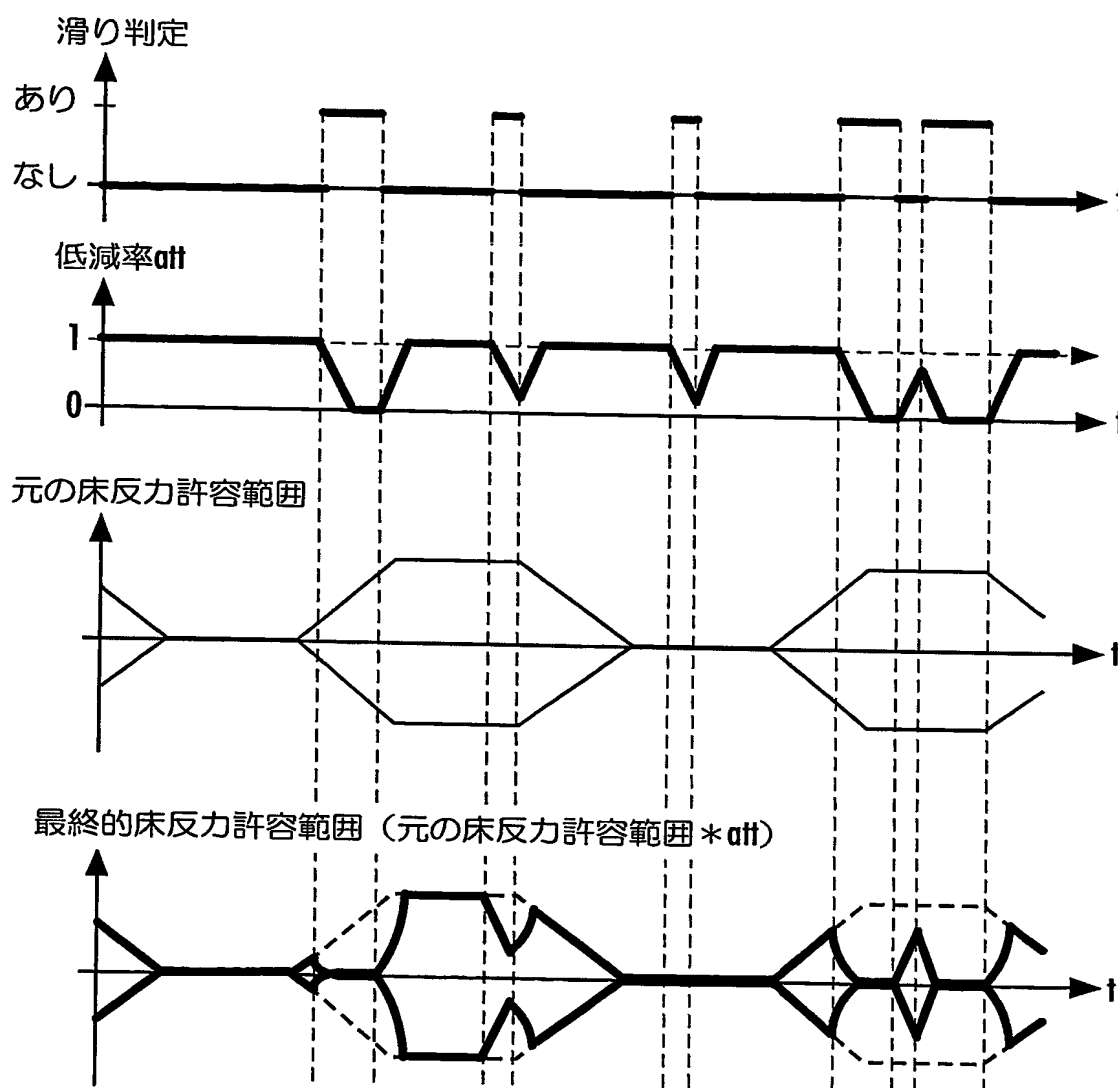


FIG.84

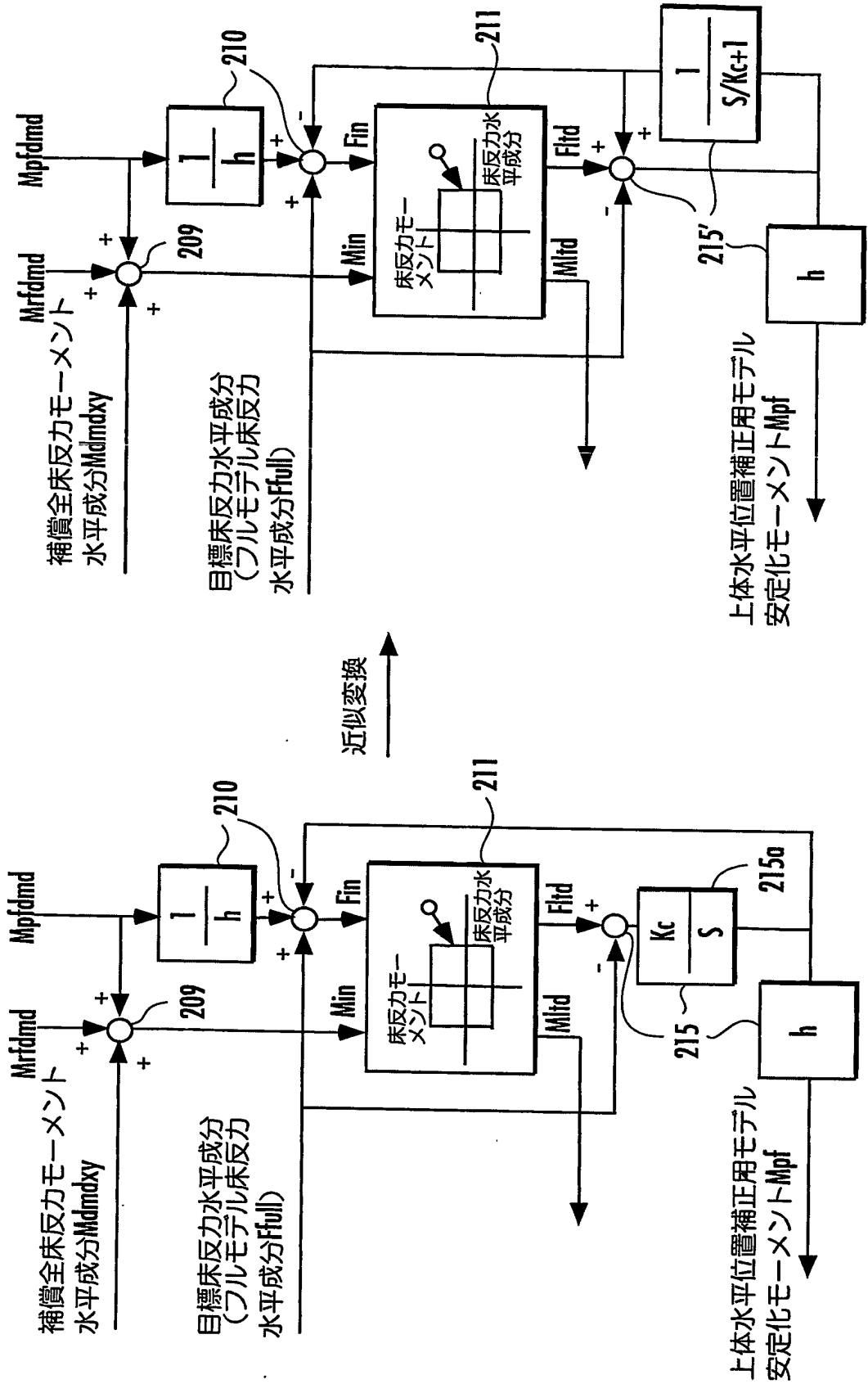
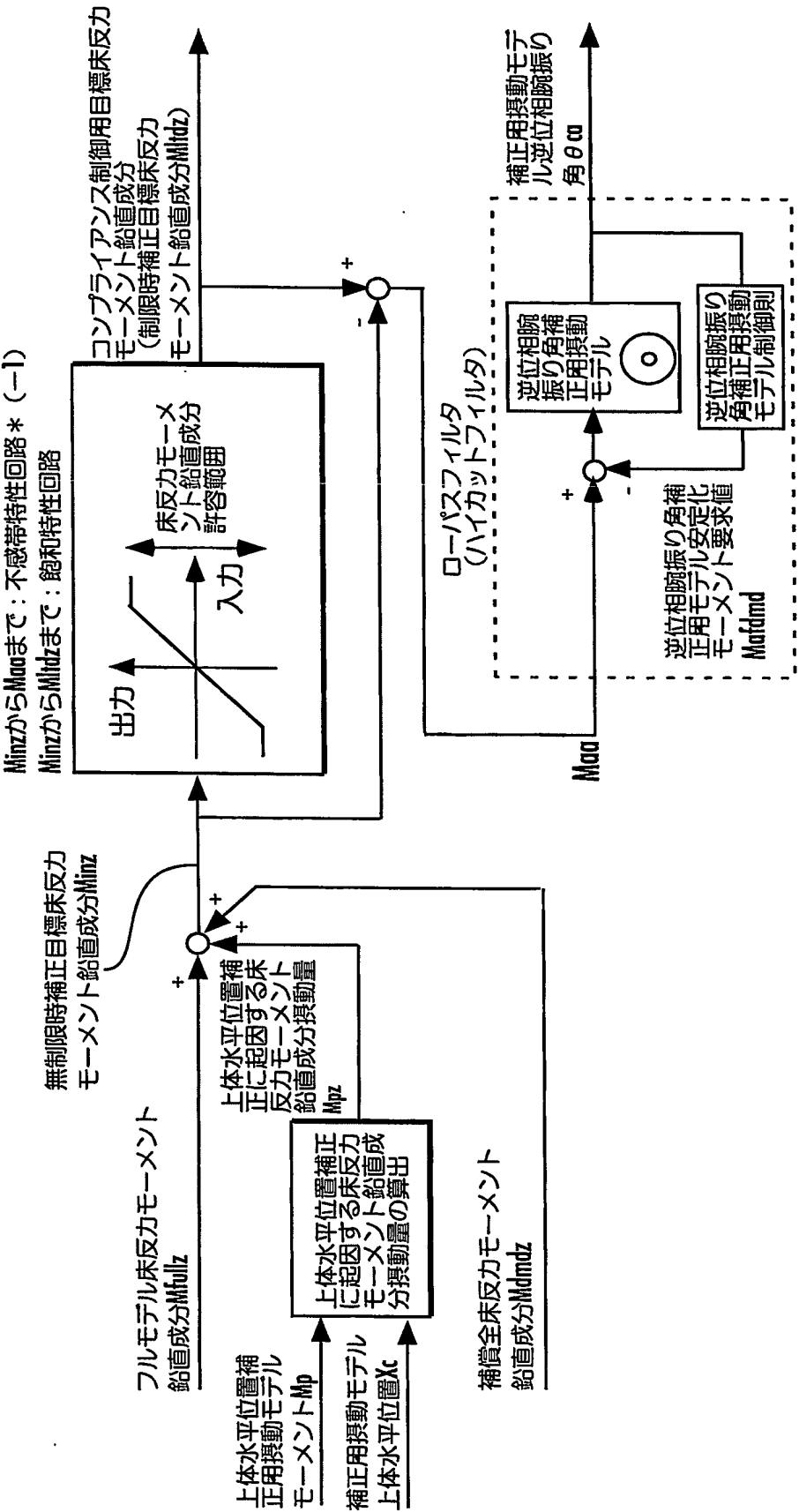




FIG.85



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/009472

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> B25J5/00, 13/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> B25J5/00, 13/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004  
Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JOIS (JICST)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2002-326173 A (Honda Motor Co., Ltd.), 12 November, 2002 (12.11.02), Full text; all drawings & WO 2002/087832 A1 & EP 1398121 A1 & US 2004/0143369 A1	1-51
A	WO 2002/040224 A1 (Honda Motor Co., Ltd.), 23 May, 2002 (23.05.02), Full text; all drawings & EP 1361027 A1 & US 2004/0044440 A1	1-51

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
22 September, 2004 (22.09.04)

Date of mailing of the international search report  
12 October, 2004 (12.10.04)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))  
Int. Cl. <sup>7</sup> B25J5/00, 13/00

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))  
Int. Cl. <sup>7</sup> B25J5/00, 13/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年

日本国登録実用新案公報 1994-2004年

日本国公開実用新案公報 1971-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)  
JOIS (JICST)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 2002-326173 A (本田技研工業株式会社) 2002. 11. 12, 全文, 全図&WO 2002/08783 2 A1&EP 1398121 A1&US 2004/014 3369 A1	1-51
A	WO 2002/040224 A1 (本田技研工業株式会社) 2002. 05. 23, 全文, 全図&EP 1361027 A1 &US 2004/0044440 A1	1-51

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

\* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日  
22. 09. 2004

国際調査報告の発送日  
12.10.2004

国際調査機関の名称及びあて先  
日本国特許庁 (ISA/JP)  
郵便番号100-8915  
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)  
八木 誠

3C 9348

電話番号 03-3581-1101 内線 3324